

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Optický telefon s parabolickými zrcadly
Optical phone with parabolic mirrors

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě 7. 5. 2010

.

podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu prof. RNDr. Vladimíru Vašínkovi, CSc. za jeho vstřícný přístup a odbornou pomoc při psaní této diplomové práce.

Abstrakt

Tato diplomová práce je zaměřená na návrh a realizaci optického telefonu s parabolickými zrcadly ve viditelném spektru. Popisuje základní vlastnosti přenosu optického signálu atmosférou a jeho využití v praxi. Rovněž blíže popisuje optické prvky použité při samotné konstrukci optického telefonu jako: optické zdroje, optické detektory, optické filtry a parabolická zrcadla. Dále je zde uveden samotný návrh optického telefonu a jeho konstrukční řešení. V samotném závěru této práce jsou uvedeny výsledky měření na optickém telefonu, zejména proměření přenosové charakteristiky celého systému.

Klíčová slova

optický telefon, optický zdroj, detektor, filtr, parabolické zrcadlo, laser, útlum, optický výkon, vlnová délka, spektrum, spontánní emise, stimulovaná emise, foton, PN přechod, ohnisko, zesilovač

Abstract

This master thesis is focused on the design and implementation of optical phone with parabolic mirrors in the visible spectrum. It describes the basic properties of optical signal transmission in the atmosphere and his use in practice. Also is close describing optical elements used in the optical design itself as a phone: optical sources, optical detectors, optical filters and a parabolic mirrors. After that, it is described the proposal optic phone and his design solutions. In the end of this thesis are shown results of measurements of optical phone, especially measurement of transmission characteristics of the whole system.

Key words

Optical phone, optical source, detector, filter, parabolic mirror, laser, attenuation, optical performance, wavelength, spectrum, spontaneous emission, stimulated emission, photon, PN junction, focal length, amplifier

Seznam použitých symbolů a zkratek

APD		lavinová fotodioda (Avalanche Photodiode)
b	[dB/km]	činitel útlumu
B₁		usměrňovač
C	[F]	kondenzátor, označení kondenzátoru
CWL		střední vlnová délka (Central Wavelengths)
D	[s/km]	disperze
D_{1,2}		diody
f	[Hz]	frekvence
F₁		pojistka
FD		fotodioda
FET		unipolární tranzistor (Field-Effect Transistors)
FSO		optika ve volném prostoru (Free Space Optics)
FWHM		šířka spektrální čáry v měřená v polovině maxima (Full Width at Half Maximum)
GND		uzemnění
h_{FE}	[-]	stejnoseměrný proudový zesilovací činitel tranzistoru
I	[A]	proud
I_B	[A]	proud báze bipolárního tranzistoru
I_C	[A]	proud kolektoru bipolárního tranzistoru
I_E	[A]	proud emitoru bipolárního tranzistoru
I_F	[A]	proud v propustném směru
I_{th}	[A]	prahová hodnota proudu
IO		integrovaný obvod
IN		vstupní svorky
l	[km]	délka přenosové trasy

L_p	[km]	překlenutelná vzdálenost
LD		laserová dioda (Laser Diode)
LED		elektroluminiscenční dioda (Light Emitting Diode)
MIC		mikrofon
OUT		výstupní svorky
P	[W]	výkon
P₁	[W]	výkon optického signálu na konci trasy
P₂	[W]	výkon optického signálu na začátku trasy
P_D	[W]	ztrátový výkon
P_d	[W]	citlivost detektoru
P_{ref}	[W]	referenční výkon
P_z	[W]	výkon zdroje
R	[Ω]	odpor, označení součástky ve schématu
R_Z	[Ω]	zatěžovací odpor
REP		reproduktor
T	[s]	perioda signálu
T_{1,2}		tranzistor
TR		transformátor
U	[V]	napětí
U_{BE}	[V]	napětí mezi bází a emitorem bipolárního tranzistoru
U_{CC}	[V]	napájecí napětí
U_{CE}	[V]	napětí mezi kolektorem a emitorem bipolárního tranzistoru
U_D	[V]	napětí na diodě
U_{DF}	[V]	úbytek napětí na diodě v propustném směru
U_F	[V]	napětí v propustném směru
U_R	[V]	napětí na rezistoru

VCSEL		laserové diody emitující v dutině kolmo na povrch (Vertically Cavity Surface Emitting Laser)
W_c		vodivostní pás
W_v		valenční pás
Z	[Ω]	impedance
δ	[dB/km]	činitel útlumu
ρ	[dB/km]	molekulární absorpce
σ	[dB/km]	je rozptyl na pevných částicích
τ	[dB/km]	je rozptyl na turbulencích
λ	[nm]	vlnová délka
λ_0	[nm]	vlnová délka v maximu

Obsah

1	Úvod	- 1 -
2	Historie.....	- 2 -
3	Optický přenos signálu.....	- 3 -
3.1	Přenos signálu atmosférou	- 4 -
3.2	Aplikace přenosu signálu atmosférou	- 6 -
4	Optické prvky.....	- 9 -
4.1	Zdroje optického záření	- 9 -
4.1.1	Elektroluminiscenční zdroje	- 11 -
4.1.2	Polovodičové lasery	- 13 -
4.2	Detektory optického záření	- 19 -
4.2.1	Fotodioda	- 19 -
4.2.2	Fototanzistor	- 22 -
4.3	Optické filtry	- 24 -
4.4	Parabolická zrcadla	- 25 -
5	Optický telefon	- 26 -
5.1	Princip optického telefonu s parabolickými zrcadly	- 27 -
5.2	Problém přeslechu.....	- 28 -
6	Návrh a realizace optického telefonu	- 30 -
6.1	Vstupní část optického telefonu	- 30 -
6.1.1	Mikrofon s předzesilovačem.....	- 30 -
6.1.2	Zesilovač a budič LED	- 33 -
6.2	Přenos signálu optickou trasou	- 35 -
6.3	Výstupní část optického telefonu	- 38 -
6.3.1	Optický detektor	- 38 -
6.3.2	Nízkofrekvenční zesilovač.....	- 39 -
6.4	Napájení optického telefonu	- 39 -
6.5	Konstrukční uspořádání optického telefonu.....	- 41 -
7	Měření na optickém telefonu	- 46 -

8	Závěr	- 48 -
	Literatura.....	- 49 -

1 Úvod

Pod pojmem optický telefon rozumíme zařízení schopné přenášet lidský hlas od jednoho účastníka k druhému, kdy k samotnému přenosu hlasu je použito optického spoje. To může být realizováno buďto pomocí optického vlákna anebo pomocí přenosu signálu ve volném prostředí. V případě této práce je k přenosu signálu mezi oběma účastníky použito volného prostředí.

V úvodu práce je obsah zaměřen na teoretický popis přenosu signálu volným prostředím s ohledem na nejrůznější útlumy vzniklé průchodem optického signálu atmosférou. Je zde rovněž zmíněno praktické využití takovýchto spojů, zejména pak technologie FSO.

V teoretické části věnované optickým prvkům, jsou popsány základní optoelektronické prvky použité ke konstrukci optického telefonu ale i prvky používané v nejrůznějších optoelektronických aplikacích. Zejména pak: elektroluminiscenční zdroje, polovodičové lasery, fotodiody, fototranzistory, optické filtry a parabolická zrcadla. U většiny prvků je vysvětlen základní princip činnosti, doplněný o obrázky a grafy, které usnadňují orientaci v pochopení dané problematiky.

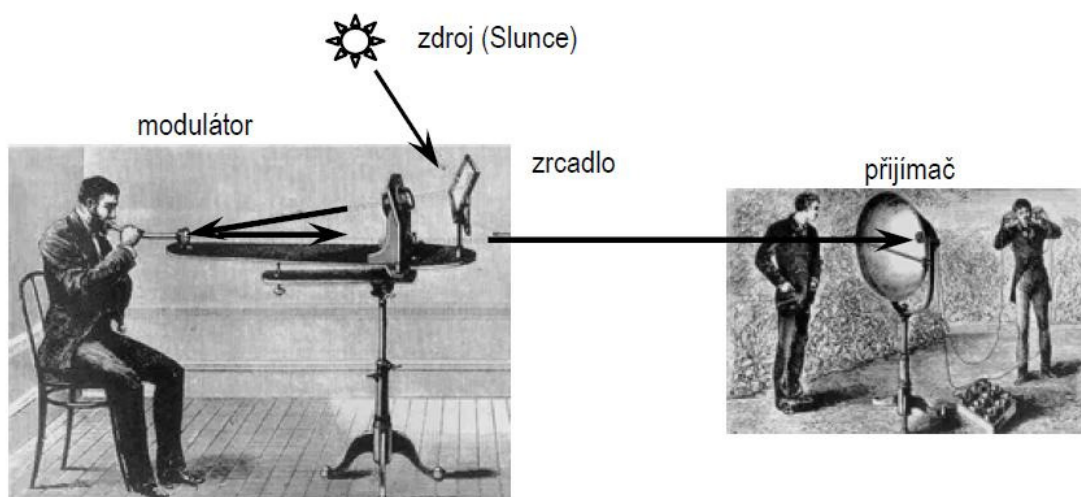
Další bod této práce je zaměřen na samotný návrh a realizaci optického telefonu. Je zde popsán princip optického telefonu s jeho přednostmi ale i úskalími, která se při návrhu objevila. Jsou zde popsány návrhy všech bloků, nutných ke správné činnosti optického telefonu. V kapitole věnované realizaci je popsána konstrukce celého zařízení, jako např. návrh a realizace desky plošného spoje a osazení součástkami, umístění ovládacích prvků a konektorů, uchycení optických zdrojů a detektorů atd.

Poslední kapitola je věnována proměření celého systému optického telefonu. Výstupem je přenosová charakteristika, která vypovídá o schopnosti telefonu přenášet signál o určité frekvenci.

2 Historie

Historicky první zařízení, které pracovalo na základě přenosu informace optickým svazkem a svým charakterem odpovídalo optickým bezdrátovým spojům tak, jak je chápeme v dnešní době, bylo patentováno A. G. Bellem a jeho spolupracovníkem Ch. S. Tainterem v roce 1880 (3. června). Bell považoval „photophone“ za svůj největší vynález, dokonce větší než telefon.

Zdrojem světla u photoponu bylo Slunce, které ozařovalo systém zrcadel, z nichž jedno mělo funkci modulátoru. Modulační zrcadlo bylo vychylováno lidským hlasem a způsobilo změny optické intenzity na selenovém článku v přijímači. Změny detekovaného optického výkonu byly v přijímači přeměněny na elektrický proud a pomoci sluchátek opět na lidský hlas. Celý tento proces modulace, demodulace a přenosu signálu volným prostorem je znázorněn na obr. 1 [5].



Obr. 1. Princip funkce Bellova „photoponu“

Technologie Bellova „photoponu“ nemohla zajistit požadovanou kvalitu komunikace, ale jednalo se o historicky první zařízení, které prakticky demonstrovalo funkci optického bezdrátového spoje.

Rádiová komunikace předvedena Marconim v roce 1895 měla rychlejší rozvoj. Větší pokrok optických bezdrátových spojů byl možný až po úspěších v oblastech laserové technologie, laserových diod, fotodiod a optických vláken [5].

3 Optický přenos signálu

Jedním z často užívaných hledisek pro třídění optoelektronických členů je hledisko použitého přenosového média. Můžeme jej pak rozdělit následujícím způsobem [1]:

- přenos s šířením vlny ve volném prostředí (tento přenos bude předmětem zájmu této kapitoly)
- přenos s planární optikou
- přenos s vláknovými vlnovody

Vlastnosti každého přenosového média ovlivňují konstrukci dalších prvků přenosového členu či sdělovací soustavy, zejména pak zdrojů a detektorů.

Každé optické prostředí je vzhledem k působení na přenášený signál charakterizováno dvěma veličinami. Tou první je činitel útlumu b , definovaný jako:

$$b = \frac{1}{l} 10 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (1)$$

Kde: l je délka přenosové trasy,

P_2, P_1 je výkon optického signálu na konci a začátku trasy

Jednotlivá prostředí se vyznačují specifickými průběhy závislosti činitele b na vlnové délce použitého záření. Z velikosti činitele útlumu, výkonu zdroje P_z a citlivosti detektoru pro daný odstup signálu od šumu P_d lze vypočítat tzv. překlenutelnou vzdálenost spoje L_p [1]:

$$L_p = \frac{\left(10 \log \frac{P_z}{P_{ref}} - 10 \log \frac{P_d}{P_{ref}} \right)}{b} \quad (2)$$

Kde: P_{ref} je referenční výkon $P_{ref} = 1 \text{ mW}$,

$P_{zr} = 10 \log \frac{P_z}{P_{ref}}$ - srovnatelný výkon zdroje [dBm]

$P_{dr} = 10 \log \frac{P_d}{P_{ref}}$ - srovnatelný příkon detektoru [dBm]

Druhou důležitou vlastností přenosového prostředí je disperze D:

$$D = \frac{\Delta t_g}{l} = \frac{1}{dv_g} \quad (3)$$

Kde: Δt_g je úplná difference skupinového zpoždění a

dv_g je úplný diferenciál grupové rychlosti šíření.

Disperzi lze chápat jako časové rozšíření úzkého osamoceného impulzu záření šířícího se přenosovým prostředím jednotkové délky. V případě optického telefonu, který je řešen v této diplomové práci, se disperze nikterak neuplatňuje. Optický telefon navržený a popisovaný níže, pracuje pouze s analogovými signály nikoliv s digitálními impulzy.

3.1 Přenos signálu atmosférou

Volným prostředím se elektromagnetická vlna šíří formou rozbíhavých nebo sbíhavých Gaussových svazků. Divergence svazku způsobuje výrazný pokles hustoty energie záření se vzdáleností od zdroje. Tento jev způsobuje základní a jediný mechanismus útlumu optického signálu na optoelektronické trase volným prostředím [1].

V atmosféře jsou přenosové parametry trasy oproti přenosu volným prostředím zhoršovány působením dodatečných útlumu a disperzí. Tyto útlumy a disperze jsou způsobeny absorpcí a rozptylem záření v atmosféře a turbulentními fluktuacemi optické hustoty atmosféry. Pokles hustoty výkonu záření způsobený atmosférickými vlivy je možno popsat vztahem:

$$S = S_0 \exp(-\delta z) \quad (4)$$

Kde: $\delta = \rho + \sigma + \tau$ je činitel útlumu,

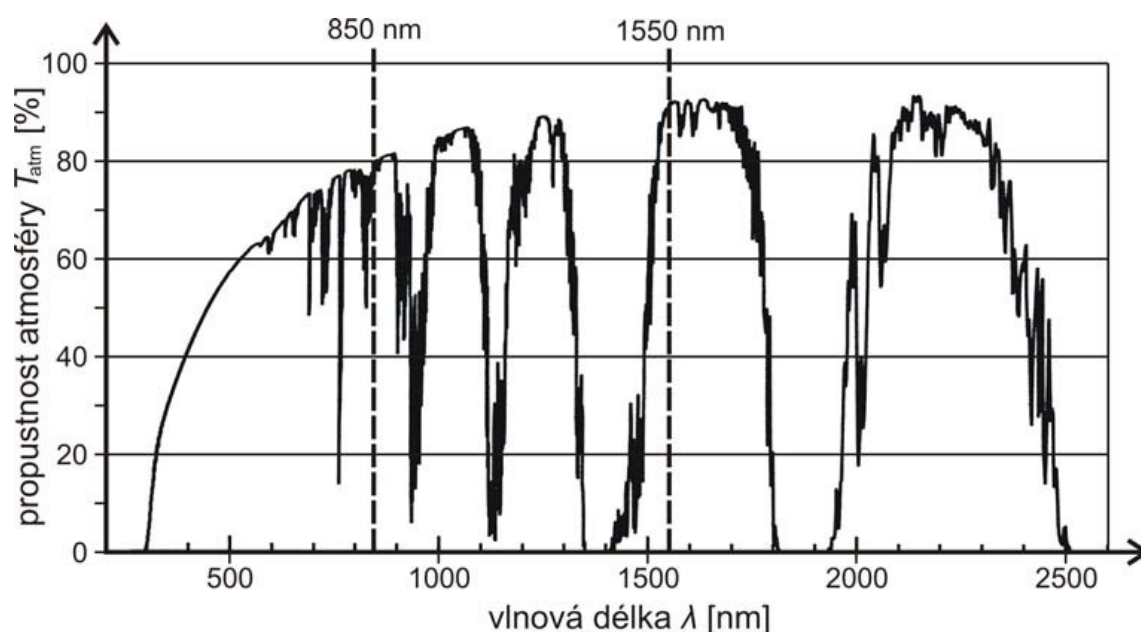
ρ je molekulární absorpce,

σ je rozptyl na pevných částicích,

τ je rozptyl na turbulentních.

Molekulární absorpce

Je způsobená zejména absorpčními čarami molekul vody, CO_2 a ozonu O_3 . Ostatní plyny pohlcují mnohem méně. Útlum roste přímo úměrně s růstem koncentrace těchto tří složek v atmosféře. Koncentrace CO_2 má v nadmořské výšce 300 m střední hodnotu 0,01% hmotnosti vzduchu. V průmyslových oblastech však koncentrace CO_2 dosahuje až stonásobku tohoto průměru. Hustota vodních par je velmi silně proměnná s časem a polohou a pohybuje se mezi 1% až 10% hmotnosti vzduchu. Koncentrace ozonu roste s nadmořskou výškou, svého maxima, 10% hmotnosti vzduchu, dosahuje ve výšce 30 km [1]. Absorpční křivku atmosféry ukazuje obr. 3.1.



Obr. 3.1 Spektrum atmosférické absorpce

V pásmu $\lambda = 0,4 \div 0,7 \mu\text{m}$ (viditelné spektrum) je molekulární absorpce zanedbatelná a je možno počítat s hodnotami $\rho = 1 \div 10 \text{ dB/km}$.

Rozptyl na pevných částicích

Způsobují ho kapičky vody, prachové částice i větší molekuly plynu, svými rozměry malé nebo srovnatelné s délkou vlny záření. Ztráty jimi způsobené klesají podle Rayleighova

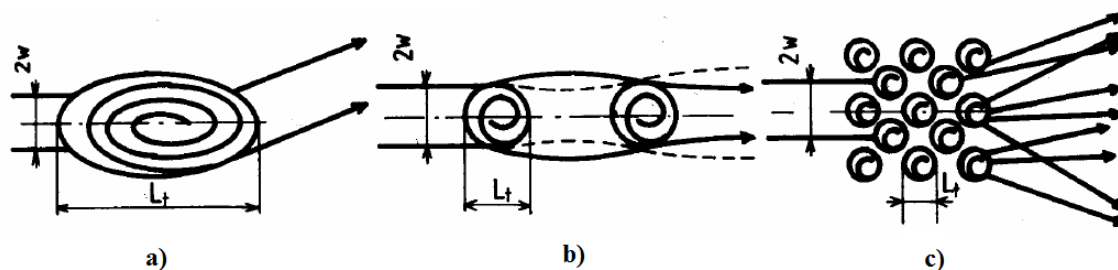
zákona rozptylu úměrně čtvrté mocnině délky vlny. Typická hodnota útlumu pro $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$ je $\sigma = 1 \text{ dB/km}$. Při mlze s viditelností pod 10 m však může dosáhnout až 300 dB/km.

Atmosférické turbulence

Vlivem soustavného mísení teplých a chladných mas vzduchu, dochází v atmosféře k náhodným fluktuacím indexu lomu, které mohou na šířící se svazek elektromagnetických vln působit několika druhy interakce v závislosti na poměru velikosti turbulentní poruchy L_t a průměru svazku $2w$. Při $2w \ll L_t$, viz obr. 3.2a, způsobí gradient indexu lomu turbulence ohyb paprsků a tím úhlovou odchylku šíření svazku od původního směru, což může mít za následek úplné přerušování přenosového kanálu [1].

Při $2w \approx L_t$, viz obr. 3.2b, se turbulence chová jako optická čočka, která obvykle způsobí zvětšení úhlu divergence svazku, aniž by změnila jeho směr šíření.

Při $2w \gg L_t$ jsou jednotlivé paprsky svazku turbulentně odkláněny do různých směrů a turbulence vyvolá intenzivní rozptyl svazku, viz obr. 3.2c.



Obr. 3.2 Typy atmosférických turbulencí a) $2w \ll L_t$, b) $2w \approx L_t$, c) $2w \gg L_t$

3.2 Aplikace přenosu signálu atmosférou

Optika bez kabelů (nebo také optika ve volném prostoru, free-space optics, FSO) nabízí spoje o vysoké rychlosti na krátkou vzdálenost a s nízkými náklady. Kořeny této technologie sahají až do 60. let minulého století, ale její širší využití přichází ke slovu až dnes, kdy je potřeba stále větší přenosová kapacita pro připojení uživatelů k rychlým páteřním optickým sítím [13].

Tato technologie v sobě skrývá přenosovou kapacitu optických sítí i jednoduchost a rychlost instalace bezdrátových sítí. Ve skutečnosti ve srovnání s přenosem optickými vlákny,

kde působí odpor skla, má bezdrátová optika podstatně větší rychlost ve vzduchu, skutečně se přibližující rychlosti světla.

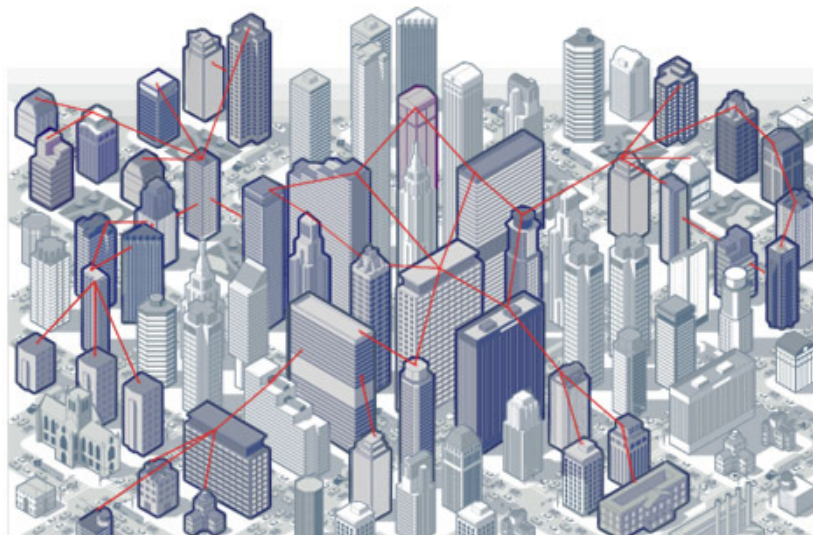
Technologie

FSO používá optické pulsně modulované signály pro bezdrátový přenos. Přenosové rychlosti, které dnešní produkty FSO podporují, nabízejí 100 Mbit/s, 155 Mbit/s (OC-3), 622 Mbit/s (OC-12) až po řádově gigabity za sekundu.

Vzhledem k dostupnosti optických prvků se používají pro přenos vzduchem následující vlnové délky: dlouhé vlny kolem 1550 nm (194 THz) a krátké vlny kolem 800 nm (375 THz). Signály na těchto vlnových délkách patří do infračerveného spektra, a jsou proto neviditelné.

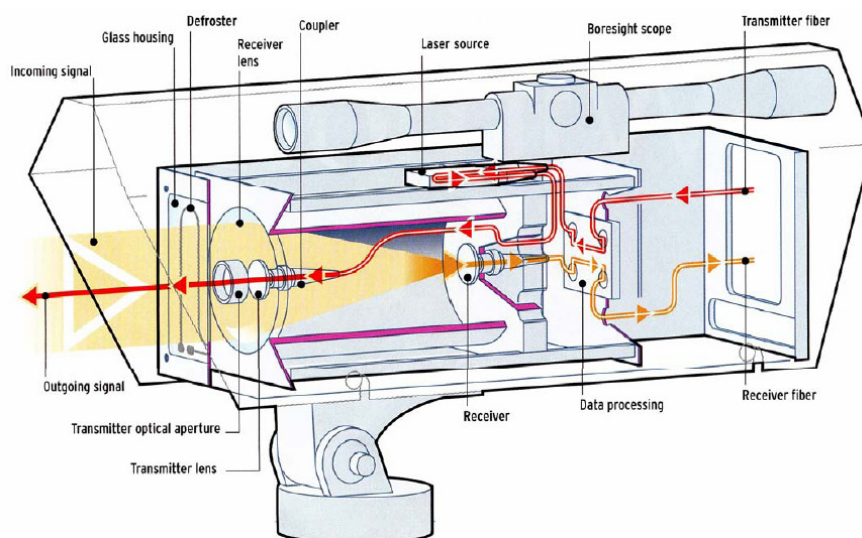
Požadavkem FSO je přímá viditelnost, tj. volná cesta bez překážek mezi transceivery s LED nebo laserovým infračerveným vysílačem a přijímačem pro komunikaci na fyzické vrstvě v režimu plného duplexu. Lasery se ovšem používají ve FSO výrazně častěji. Tyto systémy dosahují s ohledem na vlivy počasí spolehlivosti až 99,9% [13].

Vysílače a přijímače mohou být umístěny na střechách nebo u oken budovy. FSO je navrženo pro různé druhy topologií jako např. Point-to-Point, Point-to-Multipoint, Ring, Mesh, jak znázorňuje obr. 3.3 [14].



Obr. 3.3 Možnosti použitých topologií u FSO

Na dalším obrázku je pak znázorněná samotná hlavice spoje a její vnitřní struktura.



Obr. 3.4 Skladba hlavice spoje

4 Optické prvky

4.1 Zdroje optického záření

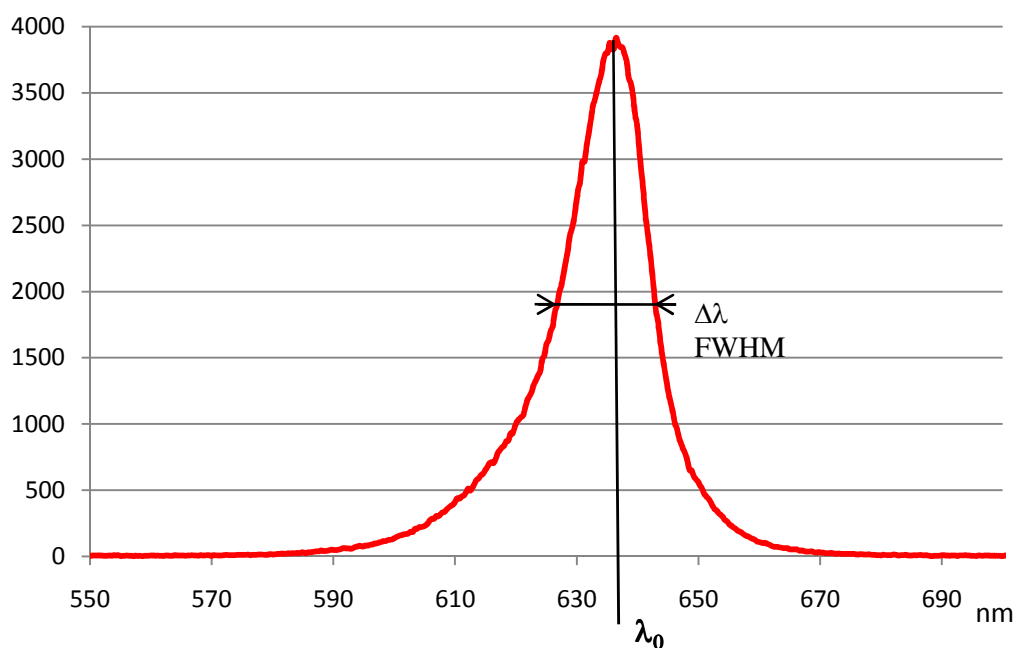
Konstrukce optoelektronických soustav přenosu a zpracování informace závisí většinou na užitém zdroji optické nosné vlny. Můžeme tedy rozlišit [1]:

- elektroluminiscenční zdroje (LED)
- polovodičové lasery
- ostatní druhy laserů

V následující části budou specifikovány základní vlastnosti optických zdrojů, které v řadě případů určují meze možnosti celé optoelektronické trasy a ovlivňují volbu dalších prvků soustavy.

Spektrum generovaného záření

Je určeno zejména průběhem závislosti spektrální hustoty optického výkonu $P_0(\lambda)$ na vlnové délce záření. Důležitou veličinou vztahující se k tomuto průběhu je šířka spektrální čáry $\Delta\lambda$ (měřená v polovině maxima (FWHM – **F**ull **W**idth at **H**alf **M**aximum)) a střední vlnová délka λ_0 (vlnová délka v maximu). Viz obr. 4.1.



Obr. 4.1 Příklad spektrální charakteristiky LED

Ke spektru optického zdroje se vztahuje ještě daný údaj o koherenční délce či koherenčním času zdroje vycházející z šířky spektrální čáry Δf emitovaného záření.

Optický výkon

Optický výkon je další důležitou veličinou, značíme ho P_0 a udává celkovou vyzářenou energii zdroje za jednotku času. Okamžitý výkon zdroje je dán integrálem časového průběhu intenzity světla \vec{I} po uzavřené ploše obklopující měřený zdroj:

$$P(t) = \oint \vec{I} \cdot d\vec{s} \quad (5)$$

Střední výkon P_0 zdroje v čase T (pro periodické průběhy $P(t)$ se volí $T = 1/f_0$) a je dán integrálem:

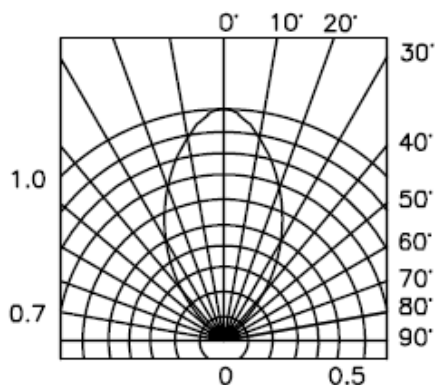
$$P_0 = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) dt \quad (6)$$

K optickému výkonu se vztahuje hodnota vnější energetické účinnosti zdroje η významná zejména při práci s vyššími výkony.

Vyzařovací charakteristika

V závislosti na konstrukčním uspořádání diody LED a provedení jejího pouzdra může mít vyzařovací charakteristika diody různou šířku a různý tvar. Příklad vyzařovací charakteristiky je znázorněn na obr. 4.2.

Vyzařovací charakteristika vyjadřuje, jak se v závislosti na odchylce od osy diody mění relativní svítivost diody. Největší hodnota relativní svítivosti je 1, znázorněná na levé svislé ose v obr. 4.2.



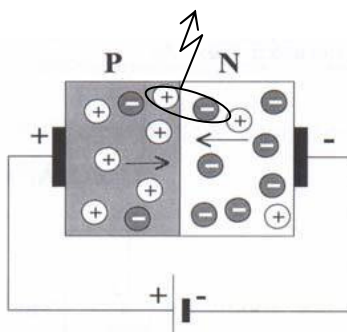
Obr. 4.2 Příklad směrové charakteristiky LED

Modulovatelnost zdroje

Popisuje schopnost zdroje v jistých mezích lineárně ovládat intenzitu, amplitudu, fázi či kmitočet výstupního záření změnou některé budící veličiny.

4.1.1 Elektroluminiscenční zdroje

Mezi nejčastěji používaná elektroluminiscenční zdroje patří bezesporu LED (Light Emitting Diode). Je u ní využíván princip elektroluminiscence, při které je PN přechodem vyzařováno optické záření. Základní princip činnosti je stejný jako u klasické usměrňovací diody. Přiložením napětí v propustném směru dochází k injekci minoritních nosičů elektrického náboje přes PN přechod. Při přechodu elektrických nábojů přes přechod dochází k rekombinaci elektronů s děrami, jak znázorňuje obr 4.3.

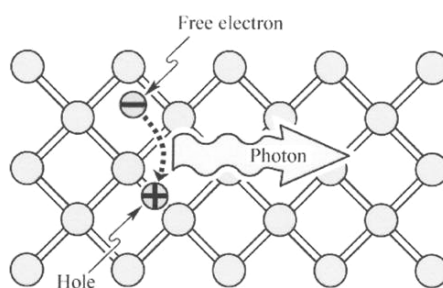


Obr. 4.3. PN přechod polovaný v propustném směru

Vlivem přiloženého elektrického pole přešly elektrony na vyšší energetickou hladinu.

Elektron zůstane na vyšší hladině různou dobu, podle toho jak stabilní bude jeho stav. Dříve nebo později však vyšší hladinu opustí a vyzáří elektromagnetické kvantum. Učiní tak sám od sebe, spontánně a proto hovoříme o **spontánní emisi** záření. Kdy se tak stane, je pro každý jednotlivý atom věci náhody.

Rekombinace jsou pochody, kdy volné elektrony ztrácejí energii a dostávají se na oběžné dráhy v atomech. Rekombinuje-li elektron s dírou, odevzdá atom energii zhruba rovnou šířce zakázaného pásu. Při rekombinaci každého páru elektron-díra se uvolní určité kvantum energie, která může být buď vyzářena mimo krystal (obr. 4.4), nebo absorbována v mřížce, což se projevuje tepelnými účinky (zvýšení teploty krystalu) [2]. Toto závisí na typu materiálu.



Obr. 4.4 Rekombinace elektron-díra a vyzáření fotonu

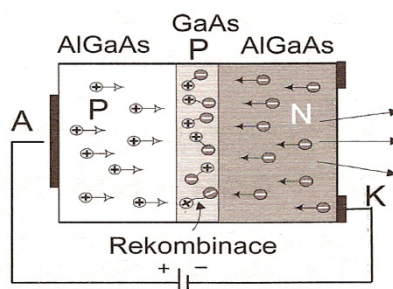
Vlnová délka vyzářené energie ve formě fotonu je dána rozdílem energií nosiče elektrického náboje před a po rekombinaci (šířce zakázaného pásu). Čím větší je energie, tím má vyzařovaný světelný paprsek kratší vlnovou délku. Pravděpodobnost zářivé rekombinace roste se zvyšující se šířkou zakázaného pásu. Pro příklad: U křemíku se šířkou pásu 1,17 eV je uvolněná energie absorbována v krystalu. Kdežto u diody vyrobené z GaAs, který má šířku pásma 1,424 eV, bude již část energie rekombinace vyzařována ve formě fotonu o příslušné vlnové délce (zde se ovšem jedná o infračervené záření).

Homogenní přechody

Homogenní přechody jsou nejjednoduššími typy přechodu, které jsou vytvářeny z jednoho typu materiálu na obou stranách dotovaného příměsí P a N. Viz také obr. 4.3.

Heterogenní přechody

Skládají se ze dvou různých polovodičových materiálů jako např. GaAs a AlGaAs, viz obr. 4.5, který zobrazuje tzv. dvojitou heterostrukturu. Heterogenní přechody obsahují více přechodu PN a jsou výkonnější než diody s homogenním přechodem. Jejich využití je význačné zejména u laserových diod.



Obr. 4.5 LED s heterogenním přechodem

Princip činnosti LED s dvojitým heterogenním přechodem je následující:

Při polarizaci diody v propustném směru jsou z oblasti typu N z AlGaAs injektovány elektrony do oblasti P z GaAs. V této oblasti se elektrony stávají minoritními nosiči a rekombinují s dírami, které jsou majoritními nosiči oblasti P, přičemž jsou uvolňována energetická kvanta ve formě fotonu. Injektované elektrony se v důsledku potenciálové bariéry na přechodu GaAs typu P a AlGaAs rovněž typu P nedostanou do oblasti typu P z AlGaAs. Střední GaAs vrstva je aktivní oblast a na její funkci závisí optický výkon LED diody.

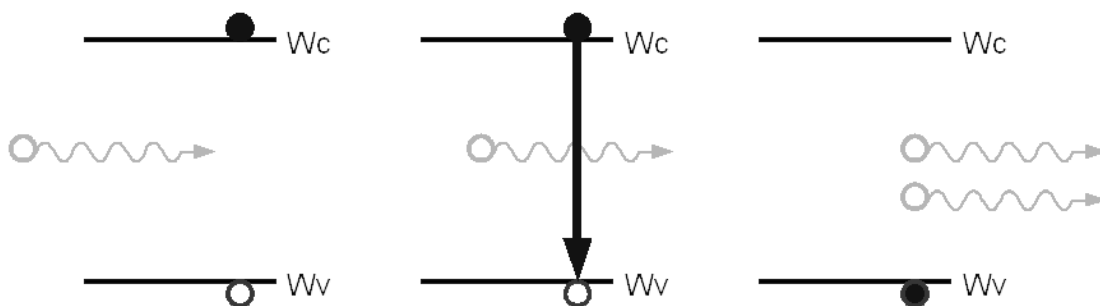
4.1.2 Polovodičové lasery

Laser (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation) je zařízení určené ke generování monochromatického optického záření. Laserové optické záření je monochromatické (jednobarevné), koherentní (uspořádané) a má malou divergenci (rozbíhavost). Pod pojmem koherence rozumíme zachování fáze a směru, neměnicí se s časem - fotony se pohybují jedním směrem a jsou v průřezu velmi rovnoměrně rozmístěny.

Podmínky vzniku laserového záření

Pro vznik koherentního záření je nutné splnění následujících tří podmínek [15]:

1. Aktivní prostředí, které umožňuje dostatečně velké zesílení fotonů mechanismem stimulované emise. V případě polovodičů je aktivním prostředím např. GaAs.
2. Existuje kladná zpětná vazba, která zajistí, že část generovaných fotonů zůstává v aktivním prostředí, aby stimulovaly další přechody elektronů z vodivostního pásu (W_c) do valenčního pásu (W_v) viz obr 4.6. Této vazby se dosáhne vložením aktivního prostředí do Fabry-Perotova rezonátoru, který je tvořen dvěma planparalelními zrcadly, z nichž alespoň jedno je polopropustné. Od zrcadel („z výstupu“) se část generovaných fotonů několikrát odrazí zpět do aktivního prostředí („na vstup“), kde stimuluje několik přechodů a nakonec vyletí polopropustným zrcadlem ven z laseru a přispěje k celkovému zářivému toku.
3. Inverze populace: V aktivním prostředí musí stimulovaná emise dominovat nad absorpcí. K tomu je zapotřebí zajistit, aby na vyšší energetické hladině (W_c) bylo více nosičů než na nižší (W_v). Tohoto stavu, který se nazývá inverzní obsazení (populace) hladin, se dosahuje buzením aktivního prostředí. V polovodičovém laseru je toho dosaženo injekcí nosičů na P-N přechodu. Inverzní obsazení se přitom rozumí inverzní oproti stavu rovnovážnému, který nastává, nedochází-li k buzení, kdy jsou nižší energetické hladiny obsazeny více než vyšší.

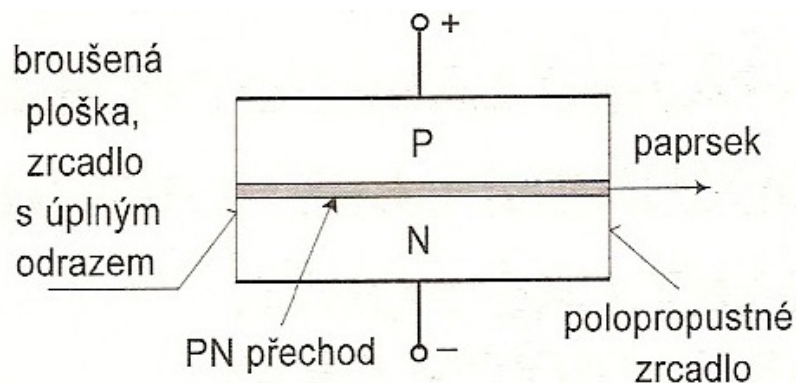


Obr. 4.6 Princip stimulované emise

Na rozdíl od spontánní emise optického záření využívané u LED diod, je u laserových diod využita tzv. stimulovaná emise optického záření. Ta spočívá v tom, že dopadá-li do soustavy na atom kvantum energie, která je rovná energetickému rozdílu uvažovaných hladin a

je-li přitom atom na vyšší energetické hladině, dopadající kvantum se nepohlčí, ale výsledkem jsou dvě kvanta světelné energie – optického záření o dvojnásobné energii [2]. V běžných podmínkách pobíhá v látce, do níž je přiváděna energie, jak stimulovaná tak i spontánní emise.

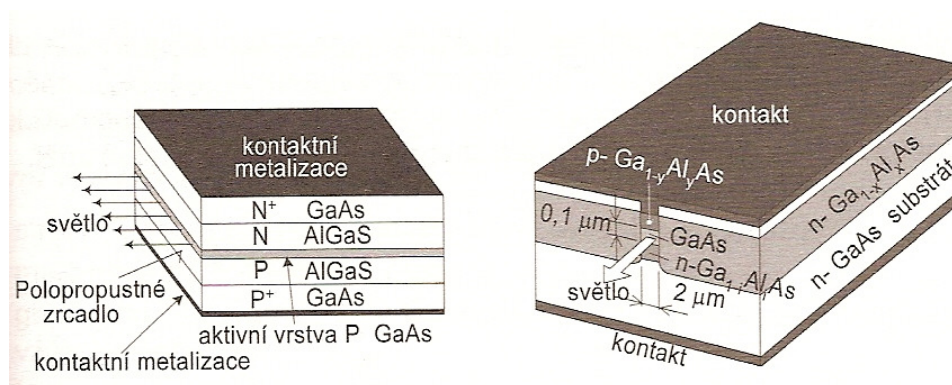
Princip konfigurace malovýkonové homogenní laserové diody je znázorněn na obr. 4.7.



Obr. 4.7 Princip laserové diody s homogenním přechodem

Koherence se dosahuje použitím optického rezonátoru, který zajistí selektivní zesílení elektromagnetické vlny s určitým kmitočtem a definovanou fází, čímž vzniká stojaté vlnění. Stupeň koherence je dán kvalitou rezonátoru. Optickým rezonátorem rozumíme oblast obklopenou odrazovými plochami, v níž je pasivní dielektrické prostředí. Nejjednodušším a u polovodičových laserů častým příkladem optického rezonátoru je soustava dvou rovnoběžných rovinných zrcadel v určité vzdálenosti proti sobě viz obr. 4.7.

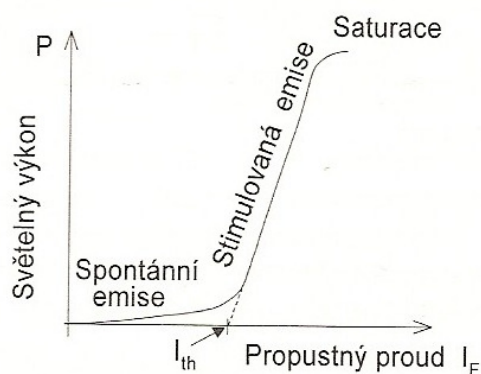
Pro dosažení vysoké účinnosti je zpravidla u laserových diod využívána dvojitá heterostruktura. Ta spočívá v tom, že mezi vrstvy AlGaAs je vložena vrstva GaAs. Vznikají tak dva PN přechody mezi různými materiály [4]. V uvedené struktuře dochází k vyzařování světelných paprsků po celé délce čelní hrany aktivní vrstvy (obr. 4.8 vlevo). Zúžení světelného svazku je dosahováno zúžením aktivní vrstvy a úpravami prostorového členění jednotlivých vrstev laserové diody (obr. 4.8 vpravo).



Obr. 4.8 Princip laserové diody s dvojitým heterogenním přechodem

L-I charakteristika

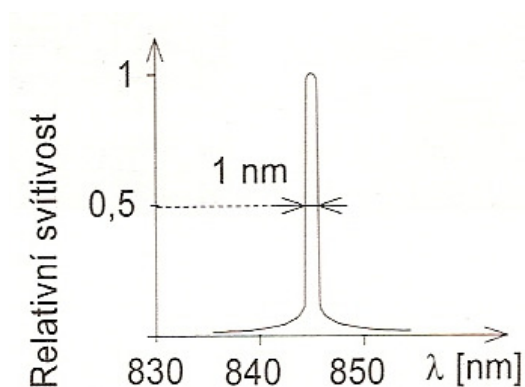
V případě LED diod je jednou z důležitých charakteristik Volt-Ampérová charakteristika v propustném směru, popisující závislost procházejícího proudu LED na přiloženém napětí. Naproti tomu u laserových diod je zcela běžnější popisovat tyto laserové diody pomocí Watt-Ampérové charakteristiky neboli L-I charakteristiky. Příklad takovéto charakteristiky je znázorněn na obr. 4.9.



Obr. 4.9 L-I charakteristika laserové diody

Princip činnosti laserové diody můžeme popsat následujícím způsobem, s využitím obr. 4.9. Po připojení napájecího napětí k LD zdroji, začne jím protékat proud v propustném směru I_F . Budeme-li postupně zvětšovat velikost proudu I_F , bude se dioda zpočátku chovat jako LED (laserová dioda vykazuje spontánní emisi) jak je patrné z obr. 4.9 v této části charakteristiky má laserová dioda malou intenzitu záření a široké, nemonochromatické optické záření.

Po překročení prahové hodnoty proudu I_{th} (th - threshold), přejde dioda náhle do režimu stimulované emise. Proto pro činnost laserové diody je nutné, aby diodou tekla proud větší než I_{th} . V tomto režimu se intenzita vyzařovaného optického záření začne prudce zvětšovat a spektrální charakteristika se podstatně zúží, viz obr. 4.10.



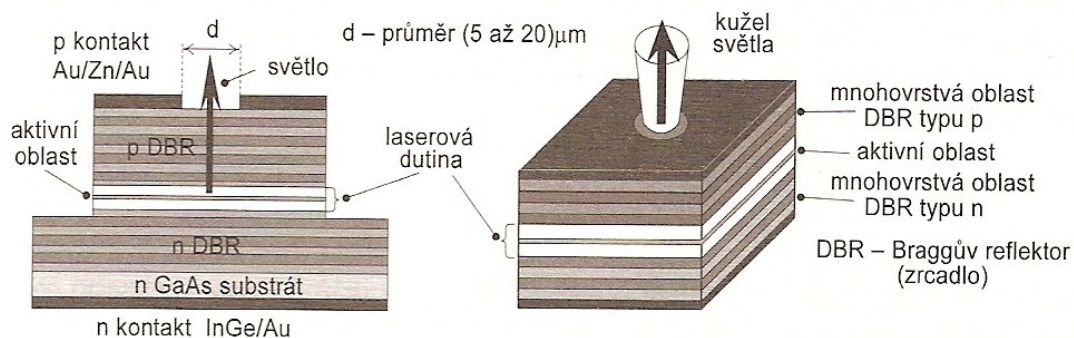
Obr. 4.10 Spektrální charakteristika LD

Samotná šířka spektrální čáry polovodičových laserů se pohybuje kolem hodnoty 1nm (u nejlepších laserových diod může tato hodnota dosahovat dokonce hodnoty 0,01nm). Na rozdíl od LED, když šířka spektrální čáry se pohybuje zcela běžně v okolí hodnoty 30nm (obr. 4.1).

Přesáhne-li proud I_F určitou velikost, přejde laserová dioda do režimu saturace, kdy se intenzita vyzařované energie nadále nezvyšuje (L-I charakteristika na obr. 4.9).

Laserové diody VCSEL

VCSEL (Vertically Cavity Surface Emitting Laser) jsou mikrolaserové diody, které vysílají optické záření generované ve vertikální rezonanční dutině kolmo na povrch. Vyznačují se několika výhodami oproti hranově vyzařujícím laserovým diodám. Jednou z těchto výhod je, že mohou být vyráběny na jednom polovodičovém plátku s dalšími komponentami.



Obr. 4.12 Princip laserové diody VCSEL

Na obrázku 4.12 je znázorněn základní princip VCSEL diody a její struktura.

4.2 Detektory optického záření

Detektory optického záření přeměňují optické záření na odpovídající elektrický signál. Podle typu aplikace jsou detektory optického záření pracující v různých oblastech světelného záření. Od ultrafialového až o infračervené.

4.2.1 Fotodioda

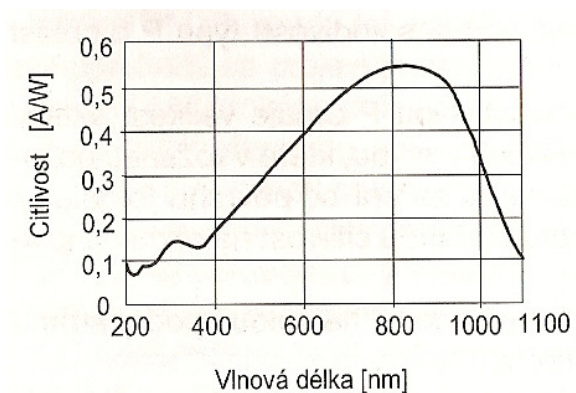
Princip fotodiody je založen na vnitřním fotoelektrickém jevu. Světlo (foton), který dopadá na přechod PN (světlo je soustředěno na přechod - např. čočkou), narazí do elektronu ve valenční vrstvě atomu a předá mu svoji energii. Elektron energii fotonu absorbuje, čímž získá dostatek energie k opuštění valenčního pásu a přeskočí do pásu vodivostního - elektron opustí vlastní atom a pohybuje se prostorem krystalové mřížky, vznikl tím volný elektron, na jeho místě vznikla díra (defektní elektron). Takto vzniklé volné elektrony jsou volné nosiče náboje, které snižují elektrický odpor polovodiče, resp. zvyšují elektrickou vodivost polovodiče.

Citlivost fotodiody

Citlivost (S) fotodiody na optické záření je udávána jako poměr výstupního proudu fotodiody I_f (A/cm^2) a přijímané světelné energie P (W/cm^2).

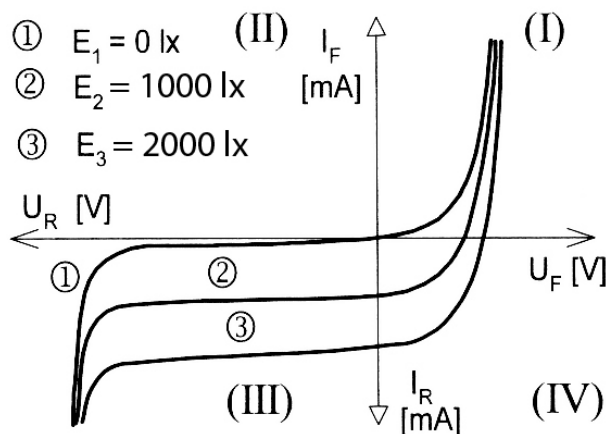
$$S = \frac{I_f}{P} \quad (7)$$

Citlivost fotodiody ovšem není konstantní ale je spektrálně závislá. Příklad spektrální závislosti Si fotodiody je na obrázku 4.13.



Obr. 4.13 Spektrální charakteristika Si fotodiody

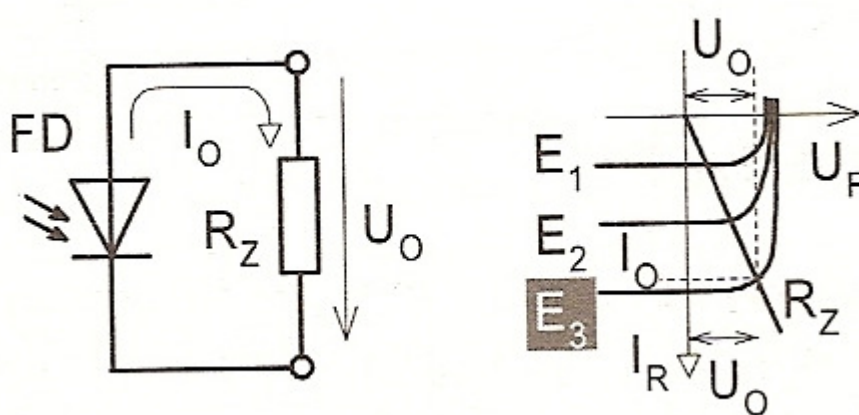
Na dalším obrázku 4.14 je zobrazena V-A charakteristika fotodiody, při různých intenzitách osvětlení.



Obr. 4.14 V-A charakteristika fotodiody

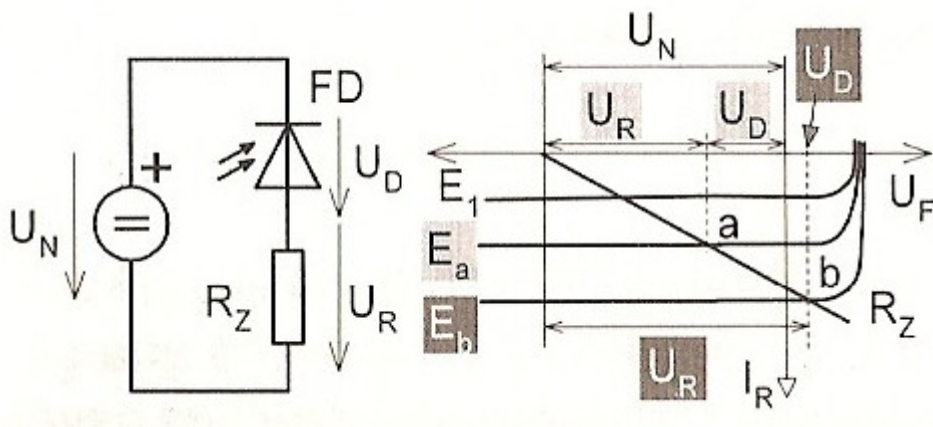
Z obrázku 4.14 je vidět, že V-A charakteristika fotodiody prochází přes kvadranty I, III a IV, přičemž se využívají pouze kvadranty III a IV.

V IV kvadrantu se pracuje fotodioda jako zdroj elektrické energie. Jedná se o tzv. hradlový režim (fotovoltaický). Tento režim je využíván např. u solárních baterií, které jsou tvořeny soustavami velkoplošných diod (účinnost cca 15%). Příklad takového použití je zobrazen v zapojení na obrázku 4.15.



Obr. 4.15 Fotodioda ve fotovoltaickém režimu

Naproti tomu v **III** kvadrantu pracuje fotodioda v tzv. odporovém režimu (fotovodivostní), kdy se chová jako spotřebič v obvodu napájeném vnějším zdrojem napětí, viz obrázek 4.16.

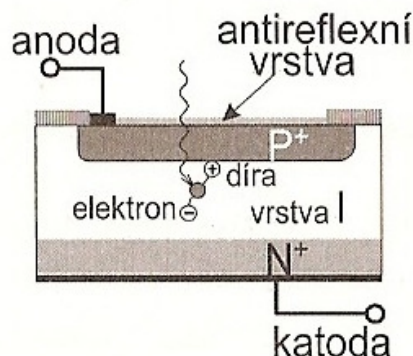


Obr. 4.16 Fotodioda ve fotovodivostním režimu

Z obrázku 4.16 je vidět, že fotodioda ve fotovodivostním stavu je zapojená v závěrném směru. Pomocí rezistoru R_Z je tak měřen proud protékající fotodiodou.

Fotodioda PIN

Na rozdíl od PN fotodiody, kdy šířka ochuzené vrstvy (aktivní oblast detekce optického záření) je malá, je v případě PIN fotodiody tato šířka ochuzené vrstvy vytvářena podle potřeby. Princip uspořádání PIN fotodiody (obr. 4.17) spočívá v tom, že mezi silně dotované vrstvy P a N je vložena slabě dotovaná vrstva. To má za následek, že měrný odpor této vrstvy je mnohonásobně větší než měrný odpor dotovaných oblastí. Takže v této oblasti je silné, rovnoměrně rozložené, elektrické pole, které zvyšuje rychlost nosičů náboje. Velmi rychlé PIN diody tak mohou pracovat na kmitočtech větších než 100GHz [2].



Obr. 4.17 Struktura PIN fotodiody

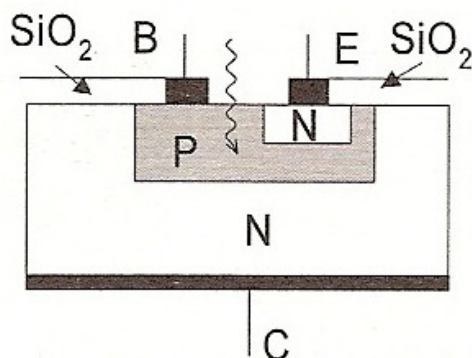
Lavinová fotodioda – APD

U klasických fotodiód a PIN fotodiód dopadající foton generuje pouze jeden pár elektron – díra, což vylučuje jejich použití pro aplikace s malou intenzitou optického záření. Aplikace s malým osvětlením vyžadují detektory s vnitřním zesílením. To umožňují lavinové fotodiody (APD – avalanche photodiode).

Na lavinovou fotodiodu je připojeno v závěrném směru velké napětí (caa 50V pro InGaAs a 300V pro Si), které uvnitř fotodiody vytváří silné elektrické pole. To způsobí velké zrychlení elektronů generovaných fotony. Elektrony se srážejí s atomy v krystalové mřížce, což způsobuje vyražení dalších elektronů (vznik dalších párů elektron – díra). Tento proces je znám jako fotonásobení. Typické hodnoty fotonásobení se pohybují v rozsahu desítek až stovek. Pro příklad: Fotonásobící koeficient 100 znamená, že po absorbování jednoho fotonu dojde k vybuzení v průměru 100 nosičů náboje. Existují ovšem i lavinové fotodiody s velkou aktivní oblastí (LAAPD – Large-Area Avalanche Photodiode) jejichž multiplikační koeficient dosahuje hodnot 1000.

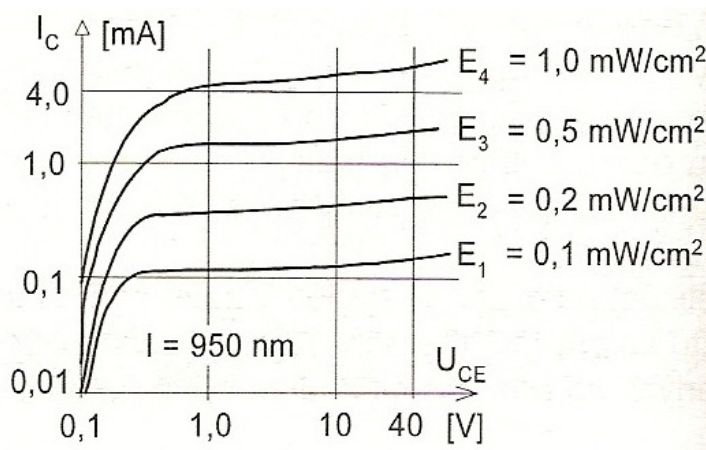
4.2.2 Fototranzistor

Fototranzistor je tranzistor, ve kterém je možné průchod nosičů náboje řídit intenzitou dopadajícího optického záření. Struktura fototranzistoru je na obrázku 4.18. Jedná se o NPN fototranzistor s vyvedenou bází. Fototranzistory mohou nebo nemusí mít vyvedenou bází.



Obr. 4.18 Struktura a princip fototranzistoru

Fototranzistor je uspořádán tak, aby optické záření bylo pohlcováno v oblasti báze (obr. 4.18). Toto záření generuje páry elektron - díra, které jsou oddělovány kolektorovým a emitorovým přechodem. Mění se tím potenciál kolektorového a emitorového přechodu. Jelikož je emitorový přechod polarizován v propustném směru, způsobí jakákoliv změna jeho napětí poměrně větší změnu kolektorového proudu tak, jak je to známo u klasického bipolárního tranzistoru. Shodná nebo alespoň podobná činnost s klasickými tranzistory je rovněž patrná z výstupních charakteristik fototranzistoru, viz obr. 4.19.

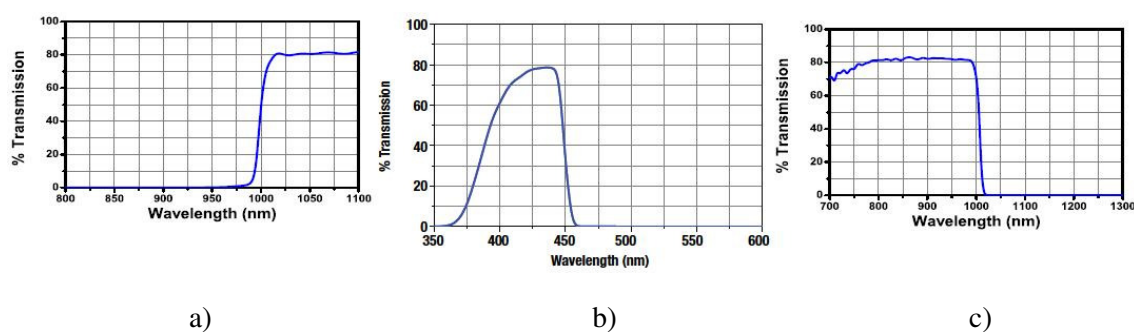


Obr. 4.19 Příklad výstupních charakteristik fototranzistoru

4.3 Optické filtry

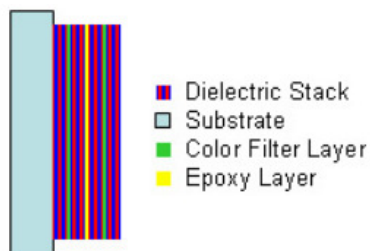
Základní vlastností optického filtru je filtrace optického signálu, kdy použitím optického filtru dojde k zamezení průchodu optického signálu s určitou vlnovou délkou a k průchodu vlnové délky pro kterou byl daný filtr navržen.

Stejně jako v elektrotechnice dělíme filtry na dolní propusti, horní propusti a pásmové propusti, tak i zde u optických filtrů můžeme použít tohoto rozdělení. Příklady jednotlivých charakteristik filtrů jsou zobrazeny na obr. 4.20.



Obr. 4.20 Spektrální charakteristiky optických filtru typu: a) horní propust, b) pásmová propust, c) dolní propust

Filtry typu pásmová propust jsou tvořeny uložením jednotlivých vrstvy materiálu na povrchu substrátu. Typicky je tam několik dielektrických sloupců oddělených prostorovými vrstvami. Dielektrické sloupce se skládají z velkého počtu střídajících se vrstev dielektrického materiálu s nízkým indexem lomu a vysokým indexem lomu. Tloušťka jednotlivých vrstev v dielektrických sloupcích je $\lambda / 4$, kde λ je vlnová délka centrální vlnové délky pásmové propusti (tj. vlnová délka s nejvyšší propustností přes filtr). Prostorové vrstvy jsou umístěny mezi dielektrickými sloupci a mají tloušťku $(n\lambda) / 2$, kde n je celé číslo. Prostorové vrstvy mohou být tvořeny z barevného skla, epoxidu, barviva, kov, nebo dielektrických vrstev. Fabry-Perot dutina je tvořena každou prostorovou vrstvou vloženou mezi dielektrické sloupce. Viz obrázek 4.21.

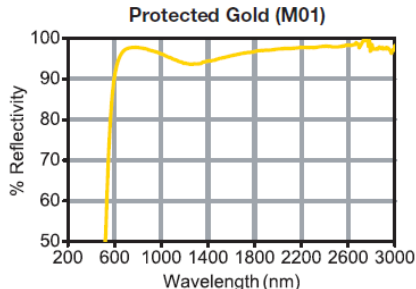


Obr. 4.21 Struktura optického filtru typu pásmová propust

4.4 Parabolická zrcadla

Konkávní zrcadla (obr. 4.23) jsou používána pro zachytávání a soustředění světelného paprsku do jednoho bodu (ohnisko), aniž by docházelo k chromatickému zkreslení. Jsou často využívána v širokopásmových aplikacích, kde chromatické zkreslení není přijatelné.

Typickými parametry takového zrcadla jsou: materiál odrazné plochy – nejčastěji zlato, stříbro nebo hliník; odrazivost v závislosti na vlnové délce (viz obr. 4.22); průměr zrcadla; ohnisková vzdálenost.



Obr. 4.22 Příklad odrazivosti zrcadla se zlatou odraznou plochou



Obr. 4.23 Parabolické zrcadlo

5 Optický telefon

Pod pojmem optický telefon rozumíme takový telefon, který pro svou vzájemnou komunikaci mezi jednotlivými přístroji (telefony) využívá optického spoje. A to buďto pomoci optického vlákna anebo optického spoje ve volném prostoru (atmosféra). V tomto případě bude propojení dvou účastníků (telefonních přístrojů) realizováno optickým spojem ve volném prostoru. Navíc zde bude využito parabolických zrcadel.

Požadavky na optický telefon

Aby se jednalo o telefon v pravém slova smyslu, je zapotřebí docílit toho, aby komunikace mezi jednotlivými účastníky byla obousměrná. Což znamená, aby komunikace mohla probíhat oběma směry čili, že účastník A bude moci komunikovat s účastníkem B ale stejně tak i účastník B bude moci komunikovat s účastníkem A. Jedná se tedy o duplexní režim provozu. V tomto případě máme na výběr mezi polo-duplexním řešením anebo plně-duplexním.

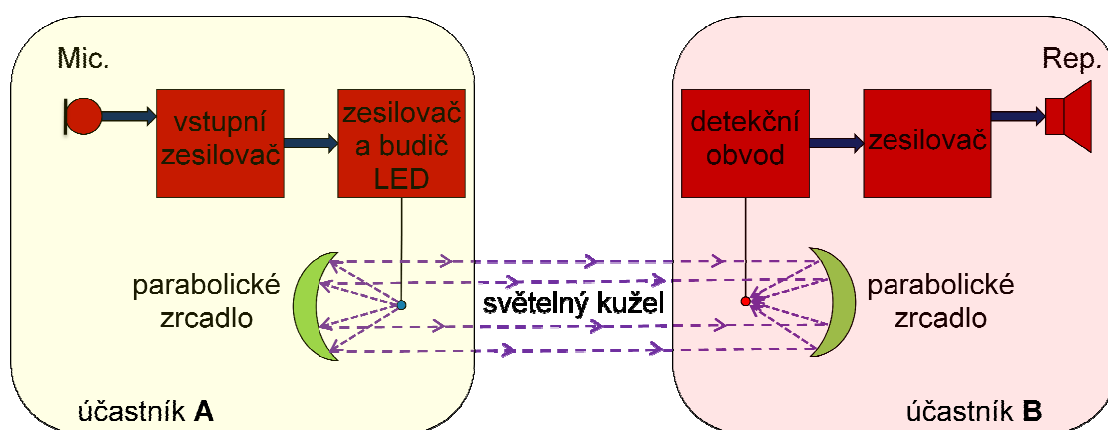
Polo-duplexní řešení (Half-duplex) představuje situaci, kdy jednotliví účastníci sice mohou spolu komunikovat oběma směry (jak úč. A s úč. B tak i úč. B s úč. A) ovšem ne současně v jeden okamžik. Toto řešení představuje situaci, kdy jednotlivé směry jsou odděleny (přepínány). Jedná se o princip známý např. z vysílaček, kdy konec sekvence je ukončen slovy typu: „přepínám“, „konec“ atp. Jedná se vlastně o zprávu pro druhého účastníka, že daný kanál je volný. Tento způsob řešení je ovšem značně nepraktický a pro použití s optickým telefonem určitě nepřichází v úvahu.

U plně duplexního režimu (Full-duplex) je situace trochu odlišná. Oba účastníci mohou spolu komunikovat oběma směry a to současně v jeden okamžik tak, jak to známe z běžné praxe například u komunikace prostřednictvím mobilního telefonu. Plně duplexní řešení sebou nepřináší pouze výhody oproti polo duplexnímu řešení, ale nastává zde problém oddělení jednotlivých kanálů pro obousměrnou komunikaci. Je třeba tedy zajistit, aby nedocházelo k rušení. Problém rušení a s ním spojené komplikace, jsou řešeny v kapitole 5.2.

Dalším požadavkem na optický telefon s parabolickými zrcadly bylo, aby celý systém byl zpracován jako hlasitý telefon a aby optická komunikace probíhala v pásmu viditelného spektra (rozmezí 400nm až 700nm).

5.1 Princip optického telefonu s parabolickými zrcadly

Samotný princip optického telefonu s parabolickými zrcadly můžeme nejlépe popsat na blokovém schématu vyobrazeném na obr. 5.1. Pro jednoduchost a přehlednost je použit simplexní provoz (jednosměrná komunikace). Nicméně celý systém pracuje v plně duplexním režimu, jak bylo popsáno výše.



Obr. 5.1 Blokové schéma optického telefonu s parabolickými zrcadly

Celý systém můžeme rozdělit do tří základních bloků:

- vysílací (vstupní) část - mikrofon, vstupní zesilovače a zdroj optického signálu
- přenos signálu optickou trasou pomocí parabolických zrcadel
- přijímací (výstupní) část – optický detektor, zesilovač a reproduktor

Vstupní a vysílací část OT

Vstupním signálem pro tento optický telefon je lidský hlas. Lidský hlas resp. jeho akustický tlak je zachycen mikrofonem a převeden na elektrický signál. Ten je zpracován a zesílen následným zesilovačem, jehož výstup je připojen k dalšímu zesilovači a zároveň budiči optického zdroje. Optický zdroj (LED) pak vysílá optický signál na plochu parabolického zrcadla. Jako zdroje optického signálu jsou použity supersvítivé LED s vlnovými délkami 590nm pro jeden směr a 660nm pro směr druhý.

Přenos signálu optickou trasou

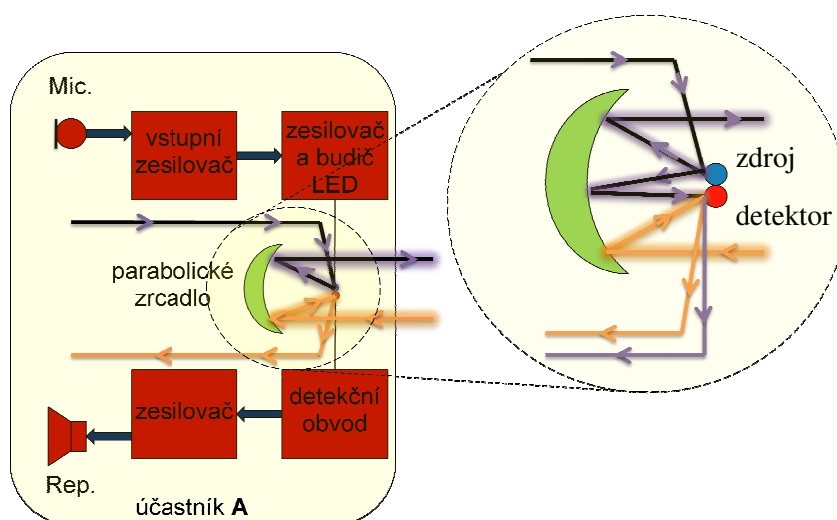
Fundamentem celého principu přenosu optického signálu přes soustavu parabolických zrcadel je základní vlastnost paraboly. *Paprsek vyzařený zdrojem, umístěným v ohnisku paraboly, se odráží od paraboly takovým způsobem, že všechny odražené paprsky jsou rovnoběžné s osou symetrie.* Při zachytávání těchto paprsků platí opačný princip. *Všechny rovnoběžné paprsky dopadající na parabolické zrcadlo, jsou odráženy do ohniska paraboly,* kde v našem případě je umístěn fotodetektor.

Přijímací a výstupní část OT

Základním prvkem tohoto bloku je optický detektor (fototranzistor) umístěný v ohnisku parabolického zrcadla, který zpracovává odrážený optický signál a převádí jej na signál elektrický. Tento signál z detektoru putuje do zesilovače, kde je zesílen na požadovanou úroveň. Výsledkem je reprodukováný hlas vycházející z reproduktoru.

5.2 Problém přeslechu

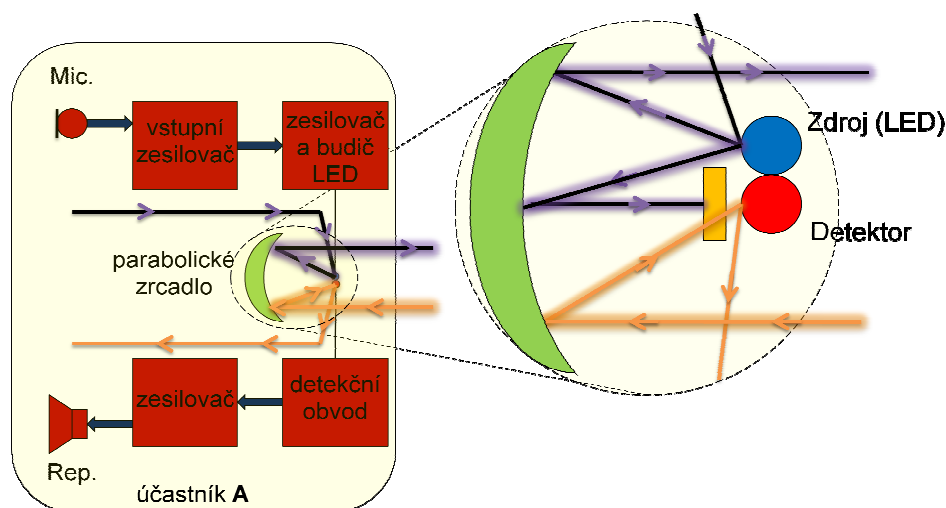
Optický telefon je koncipován jako plně duplexní řešení, což sebou přináší nejen výhody obousměrné komunikace ale také problémy s tím spojené, a sice přeslechy. Celý systém je navržen tak, že v jeden okamžik můžou navzájem komunikovat oba účastníci. Toho je docíleno použitím různých vlnových délek optických zdrojů (590nm a 660nm). Problém přeslechu vzniká na obou detektorech u obou účastníků. Princip je vysvětlen na obr. 5.2.



Obr. 5.2 Problém přeslechu

Z obrázku 5.2 je patrné, že optický signál, který vychází z optického zdroje se šíří všemi směry a dopadá na plochu parabolického zrcadla. Všechny tyto paprsky se odrážejí a postupují rovnoběžně s osou paraboly k účastníkovi B, ovšem existují i takové paprsky, které se odrážejí a dopadají přímo na detektor účastníka A. Takže ve výsledku účastník A přijímá nejenom signál od účastníka B ale i svůj vlastní. Totéž platí pro účastníka B, kdy přijímá nejenom signál od účastníka A ale i svůj vlastní. Vhodným opatřením proti takovému rušení je filtrace optických signálů pomocí optických filtrů.

Jako nejlepším řešením je použití optických filtru typu pásmová propust, jejichž spektrální charakteristika je znázorněná na obrázku 4.20 b). Princip filtrace signálů je patrný z obrázku 5.3.



Obr. 5.3 Použití optického filtru

Před každý detektor je umístěn optický filtr typu pásmová propust, jehož vlnová délka je vhodně zkombinovaná s vlnovou délkou optického zdroje protějščího účastníka. Takže, vlnová délka optického zdroje účastníka A je 590nm a filtr, který je umístěn před detektorem u účastníka B má taktéž hodnotu 590nm. Detektor účastníka B tedy zachytává pouze signál od účastníka A. Totéž platí i v opačném směru, kdy vlnová délka optického zdroje účastníka B je 660nm a filtr, který je umístěn před detektorem u účastníka A má taktéž hodnotu 660nm. Detektor účastníka A tedy zachytává pouze signál od účastníka B. Tímto způsobem docílíme odstranění jednotlivých přeslechů.

6 Návrh a realizace optického telefonu

Kapitola popisuje návrh a praktickou realizaci optického telefonu s parabolickými zrcadly. Jsou zde popsány vztahy pro návrh použitých zesilovačů, popisy jednotlivých schémat a zapojení, dále je zde uveden i samotný návrh plošného spoje a veškeré konstrukční uspořádání pro správnou funkčnost optického telefonu s parabolickými zrcadly.

6.1 Vstupní část optického telefonu

6.1.1 Mikrofon s předzesilovačem

Jak již bylo zmíněno výše, vstupním signálem je lidský hlas, což v našem případě představuje akustický tlak. Ten je zachycen mikrofonom a převeden na elektrickou veličinu (elektrický proud). Jako mikrofon je použit obyčejný stojánkový mikrofon značky Gembird MIC-111, obr. 6.1.

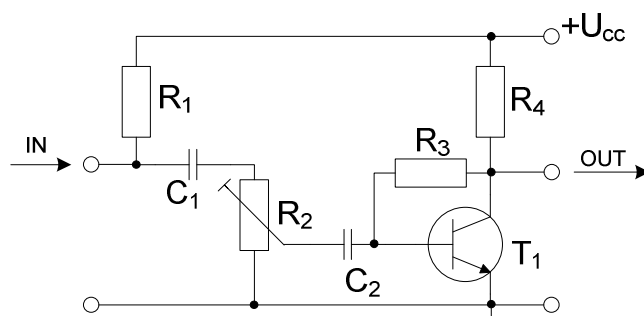


Obr. 6.1 Mikrofon Gembird MIC-111

Jedná se o mikrofon s elektretovou vložkou.

Elektretový mikrofon je typem kondenzátorového mikrofону, u něhož je elektrické pole, nezbytné pro funkci, vytvářeno elektretem, tedy nevodivou hmotou, která je permanentně elektricky nabitá. V rytmu pohybu membrány se opět mění kapacita kondenzátoru a tím i napětí mezi deskami. Změny napětí musejí být zpracovávány předzesilovačem s vysokou vstupní impedancí (zpravidla s tranzistory FET), který je proto součástí mikrofónu. [6]

Výstupní signál (napětí) z takového mikrofonu má velmi nízkou úroveň a je proto zapotřebí ho zesílit. V takovém případě použijeme zesilovač, určený pro elektretové mikrofony. Schéma tohoto zesilovače je na obr. 6.2.



Obr 6.2 Schéma zapojení předzesilovače pro mikrofon s elektretovou vložkou

Vstup zesilovače z obr. 6.2 tvoří svorky (IN) na něž je připojen mikrofon. Na rozdíl například od dynamického mikrofonu, který nevyžaduje vnější napájení, elektretový mikrofon toto napájení ke své správné činnosti potřebuje. To je zajištěno rezistorem R_1 , který přivádí napájecí napětí na svorku mikrofonu. Hodnota rezistoru R_1 je dána vztahem:

$$R_1 = \frac{Z_M}{U_M} \cdot U_{CC} - Z_M \quad (8)$$

- Z_M je impedance mikrofonu (z katalogu $Z_M = 1,5k\Omega$),
- U_M je napětí na mikrofonu (typický rozsah je 1 – 10 V, standardně se používá 1,5V),
- U_{CC} je napájecí napětí (obvod je napájen napětím 12V).

Takže po dosazení do vzorce dostaneme výslednou hodnotu rezistoru R_1 .

$$R_1 = \frac{1500}{1,5} \cdot 12 - 1500 = 10,5k\Omega$$

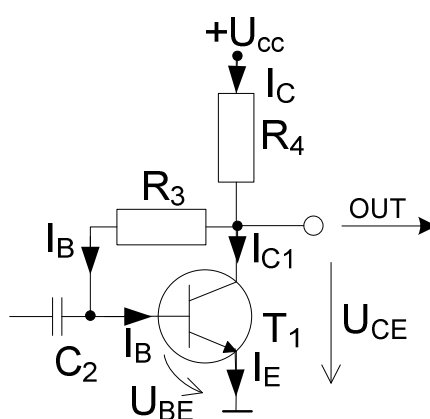
Proměnlivý rezistor R_2 slouží k nastavení citlivosti mikrofonu a je zapojen jako děliče napětí. Aby nedocházelo ke zbytečnému zatěžování mikrofonu tímto rezistorem, je jeho hodnota stanovena na $10k\Omega$, což představuje zhruba sedminásobek impedance mikrofonu.

Kondenzátory C_1 a C_2 jsou pouze vazebními kondenzátory, zabráňující průchodu stejnosměrné složky. Typická hodnota kondenzátorů pro takovéto zapojení je 100nF.

Jako zesilovací prvek je použit unipolární tranzistor T_1 . Jedná se o univerzální NPN tranzistor typu BC337 jehož základní parametry jsou:

$$U_{CE0} = 45V, \quad I_{Cmax} = 800mA, \quad P_D = 625mW, \quad h_{FE} \approx 100 \text{ (při } I_C = 10mA) \text{ [7].}$$

Aby zesilovač pracoval správně, je zapotřebí nastavit na tranzistoru T_1 vhodný pracovní bod. K tomu slouží rezistory R_3 a R_4 . Podrobný popis jednotlivých proudů a napětí je zobrazen na obr. 6.3, který rovněž poslouží pro výpočet pracovního bodu tranzistoru T_1 .



Obr. 6.3 Nastavení pracovního bodu tranzistoru T_1

Zesilovač je napájen ze zdroje stejnosměrného napětí U_{CC} (12V). Proud kolektoru I_C se volí tak, aby napětí mezi kolektorem a emitorem umožnilo zesilovat obě amplitudy signálu. Tato podmínka je bezpečně splněna při $U_{CE} \approx U_{CC}/2$ ($U_{CE} \approx 12/2 = 6V$). Pak pro R_4 platí:

$$R_4 = \frac{U_{CC} - U_{CE}}{I_C} \quad (9)$$

Proud I_C volíme 10mA, který zcela postačuje pro takto nenáročnou aplikaci a leží v oblasti, kde tranzistor pracuje jako zesilovač. Pak po dosazení do vzorce získáváme hodnotu rezistoru R_4 :

$$R_4 = \frac{12 - 6}{0,01} = 600\Omega$$

Pro dosažení požadovaného proudu kolektorem I_C , je zapotřebí do báze tranzistoru přivést proud I_B , který je roven:

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} \quad (10)$$

Proudový zesilovací činitel je katalogový údaj a jeho hodnota pro proud I_C je přibližně 100. Po dosažení dostaneme hodnotu proudu:

$$I_B = \frac{0,01}{100} = 0,1 \cdot 10^{-3} = 100 \mu A$$

Jelikož proud $I_B \ll I_C$, můžeme považovat $I_{C1} = I_C$.

Známe-li potřebný proud do báze tranzistoru T_1 , můžeme vypočítat velikost rezistoru R_3 jako:

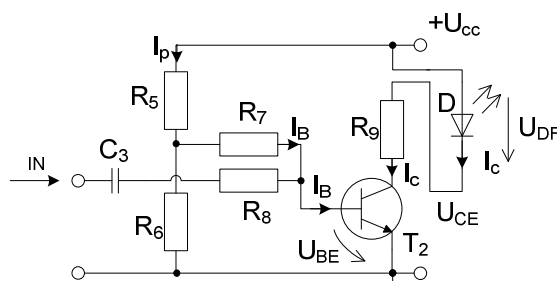
$$R_3 = \frac{U_{CE} - U_{BE}}{I_B} \quad (11)$$

Velikost napětí U_{BE} pro křemíkový tranzistor se pohybuje v rozmezí hodnot 0,6 – 0,7V. V našem případě použijeme hodnotu 0,65V. Po dosažení dostaneme velikost rezistoru R_3 :

$$R_3 = \frac{6 - 0,65}{0,1 \cdot 10^{-3}} = 53,5 \cdot 10^3 = 53,5 k\Omega$$

6.1.2 Zesilovač a budič LED

Jako další blok, který je zapojen za mikrofonní předzesilovač, je zesilovač a budič LED. Jedná se o standardní zesilovací stupeň s tranzistorem zapojeným se společným emitorem, v jehož kolektoru je zapojena LED (zdroj optického signálu). Schéma zesilovače je zobrazeno na obrázku 6.4.



Obr. 6.4 Zesilovač a budič LED

Výstupní signál (OUT) z mikrofonního předzesilovače (obr. 6.2) je přiveden na vstupní svorky (IN) zesilovače z obr. 6.4. Pro oddělení stejnosměrné složky je opět použit kondenzátor (C_3) s hodnotou 100nF. Vhodnou kombinací rezistoru R_5 a R_6 a potažmo i R_7 nastavíme správnou polohu pracovního bodu tranzistoru T_2 . Stejně jako v předchozím zapojení i zde je použit tranzistor BC337.

Aby bylo možné určit hodnoty těchto rezistorů, je zapotřebí nejdříve stanovit klidový proud I_C , který prochází diodou LED, rezistorem R_9 a tranzistorem T_2 . Vzhledem k použitým LED diodám, jejichž maximální hodnota proudu v propustném směru činí 30mA [8], budeme uvažovat proud $I_{Cmax} = 30mA$. To znamená, že při maximálním otevření tranzistoru (staruce) bude protékat kolektorový proud $I_C = 30mA$. Velikost Rezistoru R_9 , jenž udává velikost proudu I_C , tedy stanovíme takto:

$$R_9 = \frac{U_{CC} - U_{DF} - U_{CE}}{I_C} \quad (12)$$

- U_{CC} je napájecí napětí (12V)
- U_{DF} je úbytek napětí na diodě v propustném směru (pro LED 660nm dle katalogu $U_{DF} = 1,85V$ pro $I_{DF} = 30mA$ (proud diodou v propustném směru) [8])
- U_{CE} je úbytek napětí na tranzistoru mezi kolektorem a emitorem ($U_{CE} = 0,7V$) [7]
- I_C kolektorový proud (v našem případě jeho maximální hodnota)

Po dosazení do vzorce získáme hodnotu rezistoru R_9 :

$$R_9 = \frac{12 - 1,85 - 0,7}{0,03} = 315\Omega$$

Známe-li maximální hodnotu proudu I_C (30mA), můžeme spočítat proud báze I_B tranzistoru T_2 . Jelikož potřebujeme, aby jas diody byl co možná nejvyšší, zvolíme klidový proud $I_C = 20mA$. U této hodnoty proudu nabývá LED dioda své nominální hodnoty svítivosti. Proud báze I_B pak spočítáme dle vzorečku:

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} \quad (13)$$

- I_C klidový kolektorový proud (20mA)
- h_{FE} proudový zesilovací činitel (pro BC337 je $h_{FE} \approx 100$ při $I_C = 10mA$ [7])

$$I_B = \frac{20}{100} = 0,2 \cdot 10^{-3} = 0,2mA$$

Příčný proud I_p protékající rezistorem R_5 a R_6 zvolíme větší než je hodnota proudu do báze tranzistoru $I_B = 0,2\text{mA}$. Pro stanovení vhodného poměru rezistoru R_5 a R_6 byl použit freeware software „Výpočet kombinací odporů – v1.3“ [16]. Po zadání potřebných parametrů (napájecí napětí $U_{CC} = 12\text{V}$ a výstupní proudy $I_B = 0,2\text{mA}$) program zvolí vhodnou kombinaci rezistoru a sice $R_5 = 4,7\text{k}\Omega$ a $R_6 = 10\text{k}\Omega$. Velikost napětí na rezistoru R_6 při odebíraném proudu $I_B = 0,2$ je $7,5\text{V}$ (rovněž spočteno programem).

Známe-li napětí na rezistoru R_6 , můžeme spočítat velikost rezistoru R_7 . Tato hodnota je dána vztahem:

$$R_7 = \frac{U_{R_6} - U_{BE}}{I_B} \quad (14)$$

Po dosazení dostaneme hodnotu rezistoru

$$R_7 = \frac{7,5 - 0,65}{0,2 \cdot 10^{-3}} = 34\,250 = 34,25\text{k}\Omega$$

Rezistor R_8 slouží jako ochranný rezistor a jeho hodnota byla stanovena experimentálně.

$R_8 = 33\text{k}\Omega$.

6.2 Přenos signálu optickou trasou

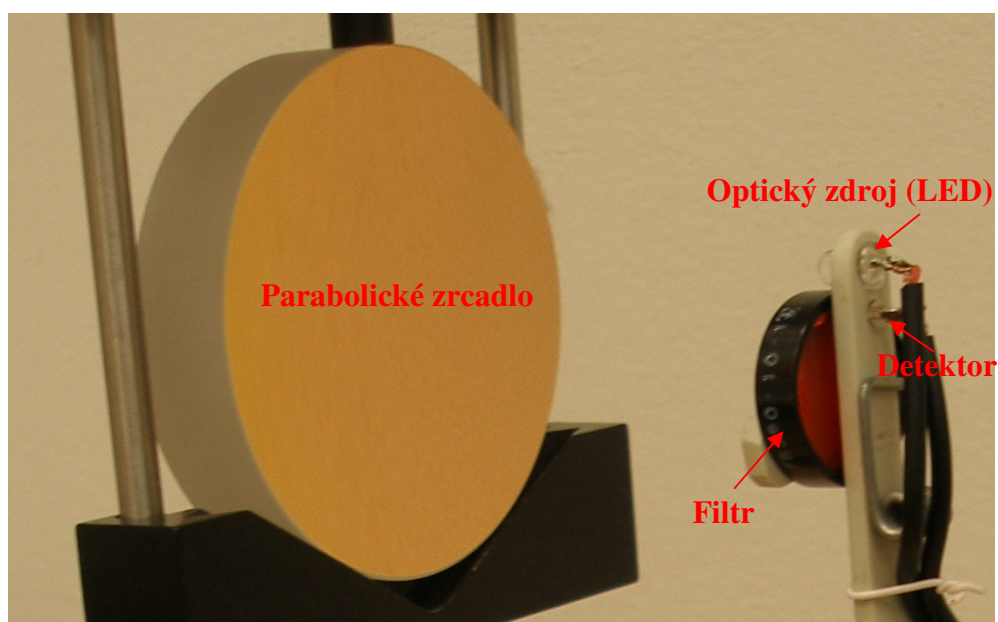
Jak bylo již zmíněno dříve, celá podstata a princip optického telefonu je založena na způsobu přenosu informace (hlasu) z jednoho konce na druhý, prostřednictvím optického spoje ve volném prostředí, s využitím parabolických zrcadel.

Samotný optický spoj je realizován na vzdálenost $0,5\text{m}$. Mechanická konstrukce a uspořádání jednotlivých prvků optické trasy je sestaveno na kolejnici, na níž jsou rozmístěny a vhodně upevněny jednotlivé držáky pro parabolická zrcadla a optické zdroje a detektory, viz obr. 6.5.



Obr. 6.5 Rozmístění komponentů optického spoje

Aby komunikace fungovala správně, je zapotřebí, aby optický zdroj a detektor byly současně umístěny v ohnisku paraboly. To ovšem není prakticky možné a proto je snaha umístit optický zdroj a detektor čím jak nejblíže k sobě. Před detektor je zapotřebí ještě umístit optický filtr, jeho průměr je 25,4mm. Mechanické uspořádání těchto tří komponentů je na obrázku 6.6.



Obr. 6.6 Mechanické uspořádání zdroje, detektoru a filtru

Optický zdroj

Supersvítivé LED: vlnová délka - 590nm, vyzařovací úhel - 60°, svítivost – 2000mcd [9]
 vlnová délka - 660nm, vyzařovací úhel - 30°, svítivost – 2000mcd [8]

Optický detektor

Fototranzistory: pracovní oblast – 380-1150nm, citlivost – 0,5mW/cm² [10]

Optický filtr

Filtry typu pásmová propust: CWL - 590nm, FWHM - 10nm
 CWL - 660nm, FWHM - 10nm

Parabolické zrcadlo

Parabolická zrcadla: zlacený povrch, průměr – 75mm, ohnisková vzdálenost 75mm

6.3 Výstupní část optického telefonu

6.3.1 Optický detektor

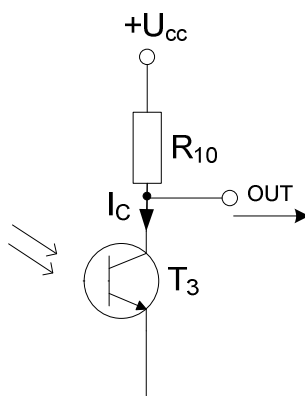
Jako optický detektor je v tomto případě použit fototranzistor. Jedná se o typ SFH309-5 s následujícími parametry [10]:

Šířka pásma – 380-1150nm

Pracovní proud – 1,6-3,2mA při 5V

Citlivost – 0,5mW/cm²

Aby tranzistor pracoval správně je zapotřebí nastavit vhodný pracovní bod. To se provede umístěním rezistoru do kolektoru tohoto fototranzistoru, čímž vznikne vhodné předpětí. Pro tento typ tranzistoru je pracovní proud v rozmezí 1,6-3,2mA. Fototranzistor T_3 je pak zapojen podle obrázku 6.7.



Obr. 6.7 Zapojení fototranzistoru

Pro správné nastavení pracovního bodu je zapotřebí určit velikost rezistoru R_{10} . Známe-li napájecí napětí U_{CC} a proud I_C , dokážeme vypočítat velikost tohoto rezistoru R_{10} jako:

$$R_{10} = \frac{U_{CC}}{I_C} \quad (15)$$

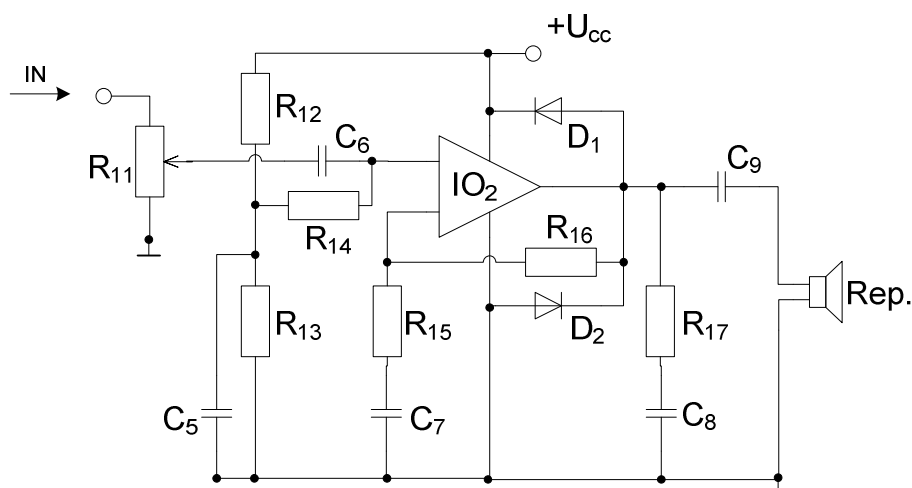
Velikost napájecího napětí je 12V a pracovní proud I_C v rozmezí 1,6-3,2mA. Velikost proudu I_C tedy zvolíme z tohoto rozmezí. $I_C = 2\text{mA}$. Pak po dosazení do vzorce dostaneme hodnotu rezistoru:

$$R_{10} = \frac{12}{2 \cdot 10^{-3}} = 6000 = 6\text{k}\Omega$$

Výstupní napětí ze svorky OUT je pak přivedeno k dalšímu bloku optického telefonu, konkrétně nízkofrekvenčnímu zesilovači.

6.3.2 Nízkofrekvenční zesilovač

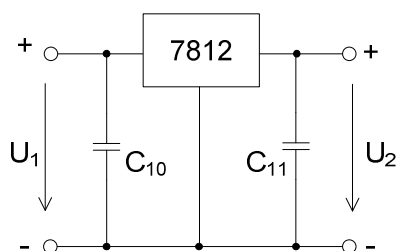
Jako zesilovač signálu, který zachytí a zpracuje fototranzistor, je použit nízkofrekvenční zesilovač typu TDA2030 (IO₂). Zapojení zesilovače je zobrazeno na obrázku 6.8, které je doporučeným zapojením pro nesymetrické napájení [11].



Obr. 6.8 Schéma zapojení nf zesilovače TDA2030

6.4 Napájení optického telefonu

Celý systém optického telefonu a všechny bloky v něm zařazené jsou napájeny stejnosměrným napětím 12V. Jedná se o stabilizované napětí. Schéma napájecího zdroje je na obr. 6.9.



Obr. 6.9 Stabilizátor napětí

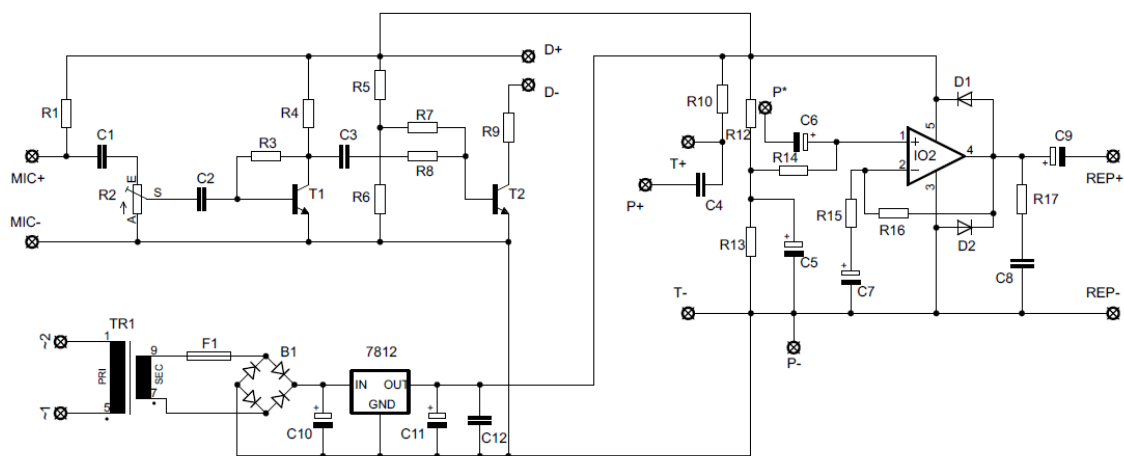
Systém je napájen ze síťového napětí 230V. Síťovou šňůrou je toto napětí přivedeno na svorky transformátoru. Transformátor je použit 230V/13V. Výstupní napětí 13V je přivedeno na usměrňovač a výstupem je pak stejnosměrné napětí. Toto napětí je už přiváděno na vstupní svorky stabilizátoru z obrázku 6.9. Kondenzátor C_{10} je použit elektrolytický s hodnotou 100 μ F. Tento kondenzátor filtruje vstupní napětí, které se tak dostává na hodnotu maxima, což představuje hodnotu $\sqrt{2}$ krát větší než efektivní hodnota (13V). Výsledné napětí U_1 je rovno přibližně 18V. To postačuje pro správnou funkci stabilizátoru, který vyžaduje napětí cca o 2,5V větší než je napětí stabilizátoru [12].

Jako stabilizátor je použit obvod typu 7812 v doporučeném zapojení [12]. Hodnota kondenzátoru C_{11} představuje taktéž doporučenou hodnotu a sice $C_{11} = 10\mu$ F. Napětí U_2 je již stabilizované s hodnotou 12V.

Celý obvod je chráněn pojistkou s hodnotou 50mA, která je umístěna na primární straně transformátoru.

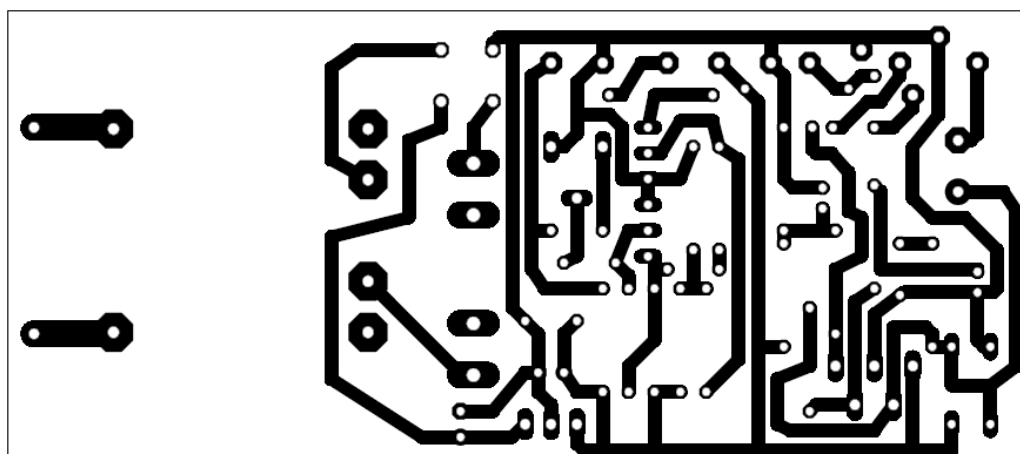
6.5 Konstrukční uspořádání optického telefonu

Kompletní schéma optického telefonu popisuje obrázek 7.1.

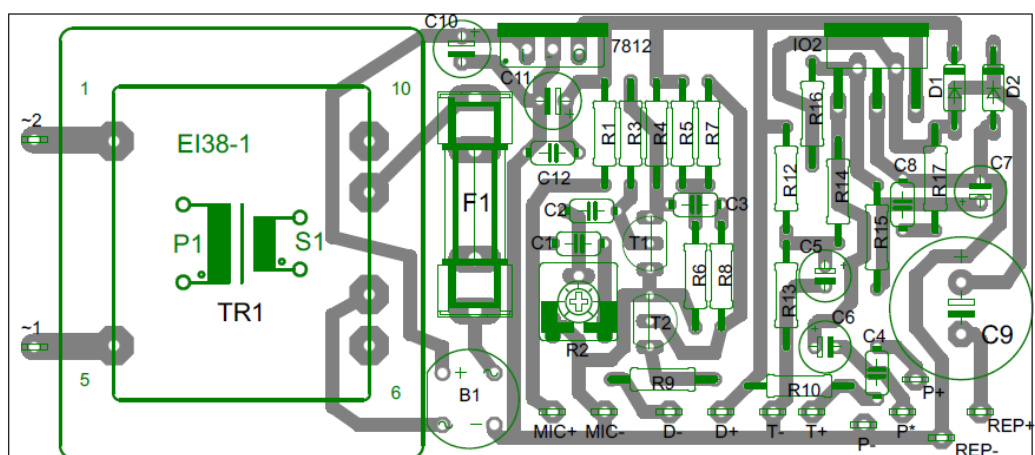


Obr. 7.1 Schéma optického telefonu

Elektronická část optického telefonu je umístěna na jedné desce plošného spoje, jejíž návrh je zobrazen na obrázku 7.1 a rozmístění součástek na obrázku 7.2.



Obr. 7.2 Deska plošného spoje – strana spojů (zrcadlově převráceno)



Obr. 7.3 Deska plošného spoje – osazení součástek

Piny vyvedené na desce plošného spoje (obr. 7.2) jsou zapojeny takto:

- ~1, ~2 svorky pro přívod střídavého napětí 230V,
- MIC+, MIC- svorky pro připojení mikrofonu,
- D+, D- optický zdroj (LED) + anoda, - katoda,
- T+, T- optický detektor (fototranzistor) + kolektor, - emitor,
- P+, P-, P* potenciometr + zapojen na C₄, - zapojen na zem, * zapojen na C₆
- REP+, REP- svorky pro připojení reproduktoru.

Seznam součástek:

<i>součástka</i>	<i>hodnota</i>	<i>poznámka</i>
R₁, R₆	10k	trimr
R₂	10k	
R₃	56k	
R₄	680	
R₅, R₁₅	4k7	potenciometr, lin.
R₇, R₈	33k	
R₉	330	
R₁₀	560	
R₁₁	20k	
R₁₂, R₁₃, R₁₄	100k	
R₁₆	150k	
R₁₇	1	keramika
C₁, C₂, C₃, C₄	100n	
C₁₂		
C₅	22μ	elektrolyt

C₆	1μ	Elektrolyt
C₇	2μ	elektrolyt
C₈	220n	keramika
C₉	2000μ	elektrolyt
C₁₀	100μ	elektrolyt
C₁₁	10μ	elektrolyt

<i>součástka</i>	<i>typ</i>
D	LED 5mm, 660nm LED 5mm, 590nm
D₁, D₂	1N4007
T₁, T₂	BC337
T₃	SFH309-5
7812	78T12
IO2	TDA2030A
B₁	B250C1500
F	F50mA
TR₁	EI38/13,6 4,5VA

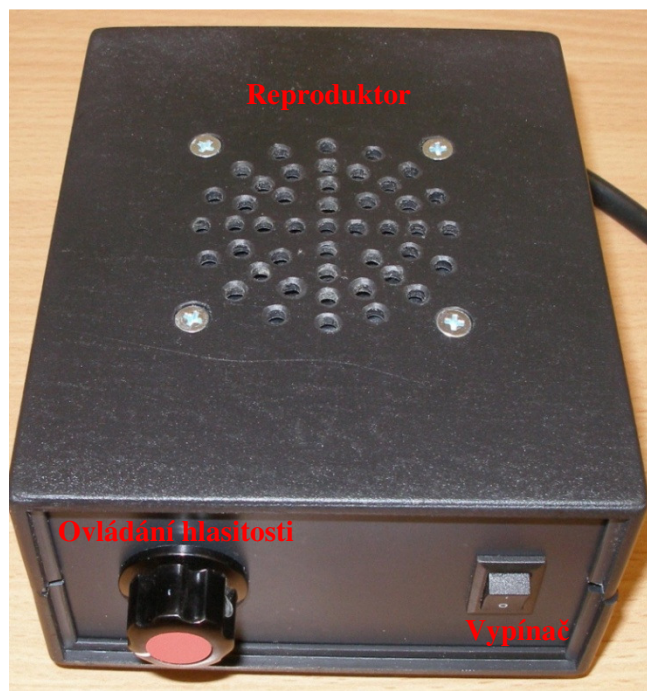
Všechny použité rezistory jsou do výkonové ztráty 0,25W. Co se týče kondenzátoru tak velikost pracovního napětí musí být větší než 12V.

Deska plošného spoje a reproduktor jsou umístěny v plastové krabici, viz obr. 7.4.

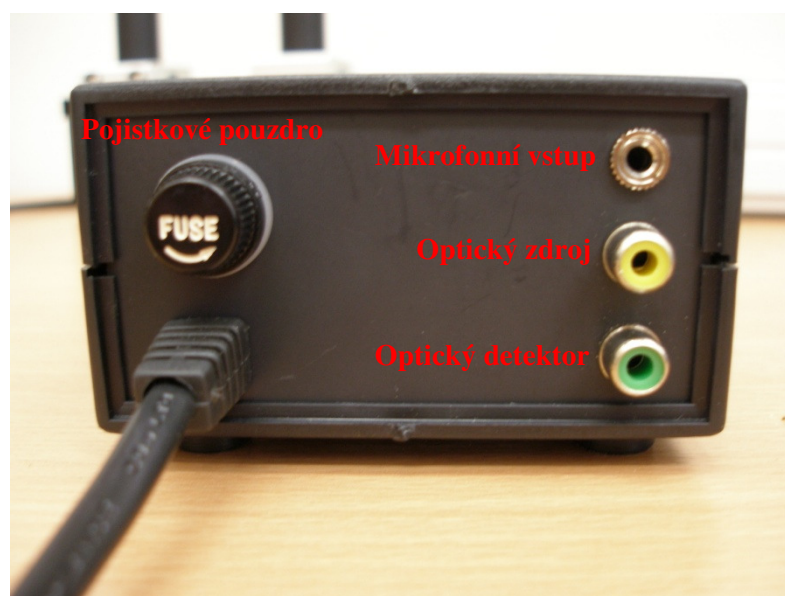


Obr. 7.4 Umístění desky plošného spoje v plastové krabici

Prvky umístěné na čelním a zadním panelu jsou zobrazeny na obrázcích 7.5 a 7.6.



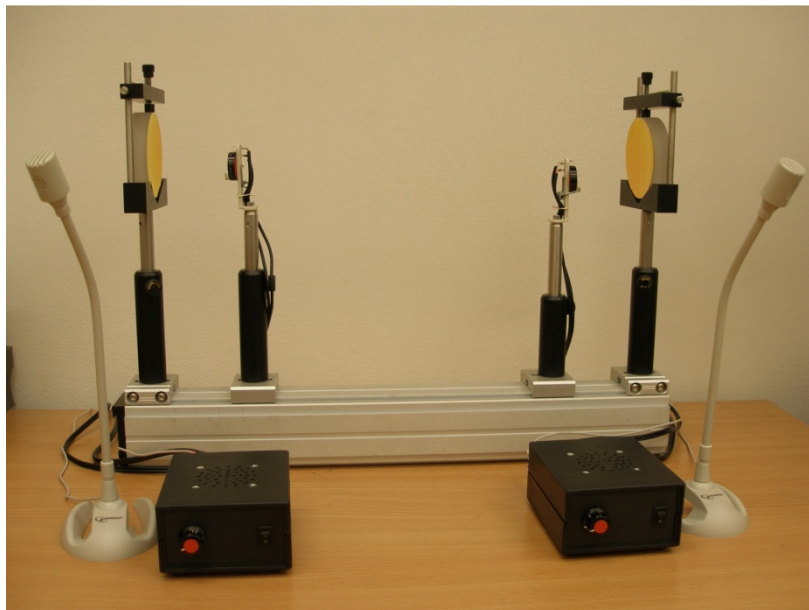
Obr. 7.5 Čelní panel s ovládacími prvky



Obr. 7.6 Zadní strana plastové krabičky

Mikrofon, optický zdroj (LED) a optický detektor (fototranzistor) jsou propojeny s jednotlivými bloky optického telefonu pomocí kabelů s patřičnými konektory, jak je patrné z obrázku 7.6.

Celý systém optického telefonu je na obrázku 7.7.



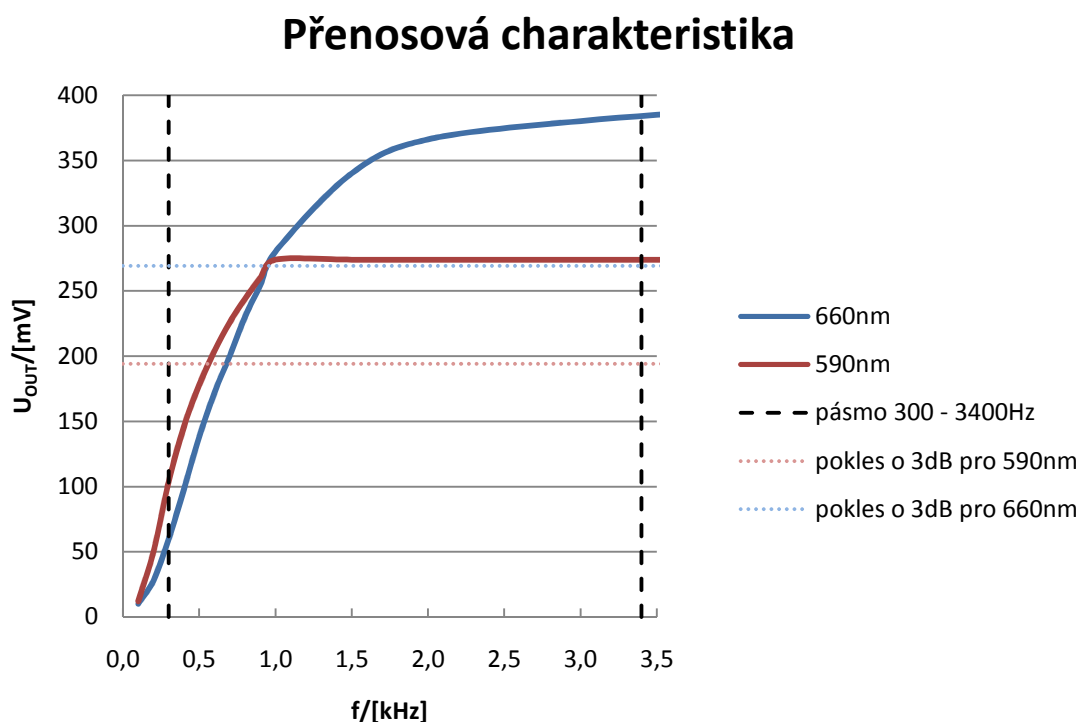
Obr. 7.7 Optický telefon

7 Měření na optickém telefonu

Funkce optického telefonu je založena napřenou hlasu z jednoho konce na druhý, kdy samotný přenos informace je realizován optickým spojem ve volném prostředí, s využitím parabolických zrcadel.

V měření na optickém telefonu je lidský hlas nahrazen nízkofrekvenčním generátorem. Vstupním signálem tak je sinusový signál v rozsahu 20Hz – 20kHz (slyšitelné spektrum). Jako detektor výstupní veličiny je použit osciloskop, na kterém jsou pozorovány a následně odečítány hodnoty výstupního napětí (amplituda na reproduktoru).

Výsledkem měření je pak přenosová charakteristika celého systému, proměřená v obou směrech ve vzdálenosti 0,5m (tabulka 7.1). V grafu je vyznačené telefonní pásmo 300Hz – 3400Hz a pokles výstupního signálu o 3dB, viz graf 7.1.



Graf 7.1 Přenosová charakteristika optického telefonu pro oba směry

Z grafu je jednoznačně patrné, že v pásmu 300 – 3400Hz dojde v obou směrech k většímu útlumu než 3dB. Jedná se zejména o nižší kmitočty.

Pro směr kdy signál vysílá LED s vlnovou délkou 660nm, se pokles o 3dB pohybuje v okolí hodnoty 1kHz a pro LED s vlnovou délkou 590nm je to přibližně 600Hz. Tento pokles může být způsobený zejména použitými kondenzátory, kdy se v obvodech chovají jako frekvenční filtry typu horní propust.

Vzdálenost 0,5m			
660nm		590nm	
f	U	f	U
[Hz]	[mV]	[Hz]	[mV]
100	10	100	12
200	28	200	50
300	60	300	104
400	98	400	146
500	138	500	178
600	172	600	204
700	200	700	226
800	230	800	244
900	254	900	260
1000	280	1000	274
1500	340	1500	274
2000	366	2000	274
3000	380	3000	274
4000	388	4000	274
5000	390	5000	274
6000	398	6000	272
7000	392	7000	266
8000	392	8000	266
9000	392	9000	266
10000	390	10000	258
11000	390	11000	250
12000	382	12000	244
13000	380	13000	236
14000	380	14000	230
15000	376	15000	220
16000	368	16000	216
17000	364	17000	208
18000	360	18000	200
19000	356	19000	194
20000	350	20000	190

Tab. 7.1 Hodnoty přenosové charakteristiky

8 Závěr

Optický telefon s parabolickými zrcadly je systém, na kterém je názorně předvedena funkčnost přenosu signálu z jednoho konce na druhý pomocí optického spoje ve volném prostoru.

Práce byla zaměřena jak na teoretický popis přenosu signálu atmosférou a popis jednotlivých optických prvků, tak i na samotný návrh a konstrukci optického telefonu s parabolickými zrcadly. V části návrhu jsou podrobně popsány návrhové vztahy pro výpočet hodnot jednotlivých součástek (rezistory, kondenzátory, atd.), ale i vztahy určující velikosti obvodových veličin (proudy, napětí). Podle spočtených hodnot byl navržen celý systém optického telefonu a následně pomocí programu EAGLE byla vytvořena deska plošného spoje. Ta byla osazena součástkami a umístěná do plastové krabičky. Zbývající součásti optického telefonu (optický zdroj, detektor a parabolická zrcadla) byly sestaveny na modulu stavebnice firmy THORLABS.

Optický telefon byl testován jak při běžném rozhovoru dvou účastníků tak i pomocí frekvenčního generátoru. Obousměrný test. Výsledkem testování pomocí frekvenčního generátoru byla přenosová charakteristika, která udává, s jakým útlumem je schopen optický telefon přenášet určité frekvence. Systém byl testován na vzdálenost 0,5m. Při snaze zvětšit tuto vzdálenost o více jak 1m, docházelo ke značnému vyvážání světla ze světelného kužele, který dopadá na plochu parabolického zrcadla a citelně tak snižuje množství dopadajícího světla na detektor. Tato vlastnost je přisuzována zejména tomu, že jak detektor, tak zdroj nemůžou být oba fyzicky umístěny v ohnisku parabolického zrcadla, což představuje ideální podmínku pro bezproblémové navázání spojení na delší vzdálenost.

Literatura

- [1] MIKEL, Břetislav, URBAN, František. *Optoelektronika a optické komunikace* 2003. 198 stran. ISBN: MEL121
- [2] DOLEČEK, Jaroslav. *Moderní učebnice elektroniky – 3. díl. Optoelektronika a optoelektronické prvky* 1. vydání, BEN - technická literatura, Praha 2005. 160 stran. ISBN 80-7300-184-5.
- [3] MALINA, Václav. *Poznáváme elektroniku VI.* 1. vydání, KOOP, České Budějovice 1999. 220 stran. ISBN 80-7232-027-0.
- [4] MAŤÁTKO, Jan. *Elektronika LASERY – Kvantové generátory světla* 1. vydání, IDEA SERVIS, Praha 1998. 60 stran. ISBN 80-85970-21-X
- [5] *Optické bezdrátové spoje* [online]. 1999 [cit. 2008-03-26]. Dostupný z WWW: http://www.urel.feec.vutbr.cz/web_pages/projekty/clanky/Wilfert_Kolka_opticke_spoje.pdf
- [6] *Mikrofon* [online]. 2010 [cit. 2010-04-13]. Dostupný z WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Mikrofon#Elektretov.C3.BD_mikrofon
- [7] *BC337* [online]. 2010 [cit. 2010-04-13]. Dostupný z WWW: http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/210/210-018/dsh.210-018.1.pdf
- [8] *LED 5mm, 660nm* [online]. 2010 [cit. 2010-04-13]. Dostupný z WWW: http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/511/511-687/dsh.511-687.1.pdf
- [9] *LED 5mm, 590nm* [online]. 2010 [cit. 2010-04-13]. Dostupný z WWW: <http://www.gme.cz/cz/led-5mm-yellow-2000-60-p511-602.html>
- [10] *Fototranzistor, SFH309-5* [online]. 2010 [cit. 2010-04-13]. Dostupný z WWW: <http://www.gme.cz/cz/sfh309-5-p520-027.html>
- [11] *TDA2030* [online]. 2010 [cit. 2010-04-27]. Dostupný z WWW: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/25043/STMICROELECTRONICS/TDA2030.html>
- [12] *7800* [online]. 2010 [cit. 2010-04-27]. Dostupný z WWW: http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/330/330-005/dsh.330-005.1.pdf

- [13] *Bezdrátové optické sítě* [online]. 2010 [cit. 2010-04-28]. Dostupný z WWW:
<http://www.lupa.cz/clanky/bezdratove-opticke-site/>
- [14] *Free Space Optics* [online]. 2010 [cit. 2010-04-28]. Dostupný z WWW:
<<http://www.freespaceoptics.org/freespaceoptics/topologies/default.cfm>>
- [15] *Polovodičové lasery a LED* [online]. 2010 [cit. 2010-04-28]. Dostupný z WWW:
<<http://www.microdesignum.cz/clanky/Polovodicove-lasery-a-LED-ky.html>>
- [16] *Výpočet kombinací odporů – v1.3* [online]. 2010 [cit. 2010-04-29]. Dostupný z WWW:
<<http://www.tichytomas.info/clanek.php?id=37>>